

**Methodik zur Softwareunterstützung in der
proaktiven Produktgestaltung und geometrischen
Absicherung von Montageprozessen**

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

von
Raphael Gerdes

Saarbrücken
2023

Tag des Kolloquiums: 21.06.2023

Dekan: Prof. Dr. Ludger Santen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber

Vorsitz: Prof. Dr. Andreas Schütze

Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Amine Othmane

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit im Fachbereich Planung Motor-
montage bei der BMW Group in München sowie am Zentrum für Mechatronik und Au-
tomatisierungstechnik (ZeMA) in Saarbrücken.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Rainer Müller
für die wissenschaftliche Betreuung, Begleitung und Förderung sowie die anregenden
Gespräche, die zu der Qualität der Arbeit beigetragen haben. Ich bedanke mich sehr
bei Prof. Dr. Michael Vielhaber für die Übernahme des Koreferates. Für die Über-
nahme des Prüfungsvorsitzes bedanke ich mich herzlich bei Prof. Dr. Andreas
Schütze. Zuletzt danke ich Herrn Dr. Amine Othmane für die Vervollständigung des
Prüfungsausschusses.

Mit meinen Kolleginnen und Kollegen bei der BMW Group konnte ich mich jederzeit
fachlich und wissenschaftlich austauschen, was ein wesentlicher Beitrag für das Ge-
lingen dieser Arbeit darstellte. Hier möchte ich mich bei Marco Poitsch und Dr. Jan
Eilers bedanken für das persönliche Coaching und die Freiräume und zugleich tiefen
Einblicke in das Montageplanungsgeschäft der BMW Group, die Sie mir in der Zeit
meiner Promotion gewährt haben. Besonderer Dank gilt meinem BMW-internen Be-
treuer Dr. Lukas Hermanns dafür, dass er immer ein offenes Ohr und einen Rat für
mich hatte und immer die richtigen Fragen gestellt hat. Bedanken möchte ich mich
auch bei meinen Doktorandenkollegen Christian Siedelhofer und Stefan Deuringer für
den tiefen wissenschaftlichen Austausch. Einen weiteren Dank möchte ich an meine
studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aussprechen, deren Abschlussarbeiten
ich während meiner Promotionszeit betreuen durfte.

Herzlichen Dank auch an meine Eltern für die Förderung auf dem Weg, der zu meiner
Promotion geführt hat, und die Unterstützung während der Promotion.

Besonderer Dank gilt meiner Frau Rebecca für die Geduld und die bestärkenden
Worte, mit denen sie mich immer wieder motiviert hat, und meiner Tochter Mathilda,
die mit ihrer Lebensfreude besondere Motivation war, diese Arbeit fertigzustellen.

Freising, Juni 2023

Zusammenfassung

Erstentwürfe von Produkten sind häufig nicht mit den bestehenden Montagesystemen baubar. Zur Erreichung der Serienreife müssen das Produkt oder die Montagebetriebsmittel meist mit hohen Kosten angepasst werden.

Zur Lösung dieses Problems existieren in der Vorentwicklung zu wenig Methoden zur Vermeidung von Baubarkeitskonflikten. In der Serienentwicklung werden Betriebsmittelfähigkeiten häufig in Textform kommuniziert. Schnittstellenverluste zur Bauteilkonstruktion in CAD führen zu Verletzungen der Fähigkeiten. Zur Prüfung der Baubarkeit der Produkte auf den Betriebsmitteln existieren parameterbasierte Ansätze, die für geometrische Untersuchungen nicht praktikabel sind. Alternativ werden Simulationsmethoden verwendet, die viel Know-How in CAD-Systemen voraussetzen oder nicht für die geometrische Absicherung entwickelt wurden.

In der Arbeit wird für die proaktive Produktgestaltung in der Vorentwicklung eine Methodik zur frühen Berücksichtigung der Betriebsmittel entwickelt. Diese wird in der Serienentwicklung durch die Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten im CAD-System ergänzt. Somit können diese im Entwicklungsprozess effektiver berücksichtigt werden. Durch Softwareunterstützung in der geometrischen Absicherung der Baubarkeit wird eine höhere Effizienz und Standardisierung erreicht. Damit können schnellere und gezieltere Entscheidungen getroffen werden, um die Integrationskosten zu senken. Anhand eines Industrieproblems wird die Wirksamkeit der Methodik validiert.

Abstract

First sketches of products often cannot be produced with existing assembly systems. To reach a maturity for series production the product or the assembly resource need to be changed which usually results in high costs.

To solve this problem there are too few methods for pre-development to avoid assembly conflicts. In series development resource capabilities are mainly communicated in a text format. Interface losses to the product design in CAD result in the violation of resource capabilities. There are parameter-based solutions to check the products for assembly conflicts with existing resources, which are not feasible for geometric assembly checks. Alternatively, simulation methods are used which require a high level of knowledge about CAD-systems or were not developed for a geometric assessment.

In the thesis a methodology for the proactive product design in pre-development is developed to consider the resource earlier. This is complemented by a visualization of resource capabilities for series development in the CAD-system. This allows a more effective consideration of the capabilities within the development process. The software-support of the geometric assessment of the mountability allows a higher efficiency and standardization. Thereby decisions can be taken faster and more specifically to reduce integration costs. The effectiveness of the methodology is validated by a problem of the industry.

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Forschungsfragen und Zielsetzung	3
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen der Montageplanung	7
2.1	Begriffliche Grundlagen	7
2.1.1	Produkt, Betriebsmittel und Montageprozess	7
2.1.2	Produktentstehungsprozess	11
2.1.3	Montageplanung	12
2.1.4	Proaktive Produktgestaltung	15
2.1.5	Iterative Produktoptimierung	18
2.2	Methodische Grundlagen und Werkzeuge	21
2.2.1	Klärung der Begriffe Methode, Methodik, Modell und Werkzeug ...	22
2.2.2	Clusteranalyse und Klassifikation	22
2.2.3	Datenbanken und Datenmodelle	22
2.2.4	Computer Aided Design (CAD)	24
2.3	Entwicklungs- und Montageplanungsprozesse in der Industrie	24
2.3.1	Proaktive Produktgestaltung in der Industrie	25
2.3.2	Geometrische Absicherung in der Industrie	26
2.4	Zwischenfazit: Herausforderungen in der Theorie und Praxis	29
2.5	Anforderungen an die Arbeit	32
3	Stand der Technik	37
3.1	A) Basismethoden und -modelle	37
3.1.1	Strukturierung von Montageprozesstypen	37
3.1.2	Strukturierung von Betriebsmitteln	40
3.1.3	Datenmodelle zur Beschreibung von Metadaten für die Montageplanung	42
3.1.4	Erzeugung des Bauzustands	46
3.2	B) Rekonfigurationsräume	47
3.2.1	Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen	48
3.2.2	Definition von Rekonfigurationsräumen für die Produktgestaltung	49
3.3	C) Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten	51
3.3.1	Modelle zur intuitiv verständlichen Visualisierung	51
3.3.2	Identifikation produktrelevanter Darstellungsinhalte	54
3.3.3	Produktkompatible Visualisierungsmodelle der Betriebsmittelfähigkeiten	55

3.3.4	Regelwerk zur strukturierten Erstellung der Visualisierungsmodelle	55
3.4	D) Softwaregestützte Baubarkeitsprüfung	56
3.4.1	Vorbereitung der Betriebsmittelmodelle	56
3.4.2	Automatisches Finden von Anforderungen im CAD-Produktmodell	58
3.4.3	Abgleich von Produkthanforderungen mit Betriebsmittelfähigkeiten	62
3.4.4	Standardisierte Aufbereitung der Baubarkeitsprüfungsergebnisse	65
3.5	Forschungslücke und konkrete Handlungsbedarfe	69
3.5.1	Forschungslücke zu Handlungsziel A: Basismethoden und -modelle zur Softwareunterstützung	69
3.5.2	Forschungslücke zu Handlungsziel B: Rekonfigurationsräume.....	72
3.5.3	Forschungslücke zu Handlungsziel C: Intuitiv verständliche Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten in CAD	73
3.5.4	Forschungslücke zu Handlungsziel D: Automatisierung und Standardisierung der Baubarkeitsprüfung	76
4	Übersicht über die Methodik	79
5	Methodik zur Softwareunterstützung in der proaktiven Produktgestaltung und geometrischen Absicherung	83
5.1	A) Basismethoden und -modelle	83
5.1.1	Prozess- und Betriebsmittel-Klassifizierung	83
5.1.2	Datenmodell	88
5.1.3	Automatisierte Bauzustandserzeugung.....	91
5.2	B) Rekonfigurationsräume.....	99
5.2.1	Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen	99
5.2.2	Definition von Rekonfigurationsräumen	101
5.3	C) Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten	103
5.3.1	Aufbau von Visualisierungsmodellen für Betriebsmittelfähigkeiten	103
5.3.2	Regelwerk zur Visualisierung.....	111
5.4	D) Softwaregestützte Baubarkeitsprüfung.....	116
5.4.1	Erfassung von Betriebsmittelfähigkeiten	117
5.4.2	Automatisierte Erfassung von Produkthanforderungen	119
5.4.3	Dreistufiger Abgleich von Anforderungen und Fähigkeiten und Ergebnis.....	121
5.4.4	Entscheidungsgrundlage.....	127
5.5	Zusammenfassung der Methodik	129
6	Validierung in der BMW Group Motormontageplanung	133
6.1	Anwendungsfeld und Validierungsfälle	133
6.2	A) Validierung der Basisbausteine	137
6.2.1	Klassifizierung von Montageprozessen und Betriebsmitteln	137

6.2.2	Datenmodell	141
6.2.3	Automatisierte Bauzustandserzeugung.....	143
6.3	B) Validierung der Rekonfigurationsräume.....	148
6.4	C) Validierung der Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten	154
6.5	D) Validierung der softwaregestützten Baubarkeitsprüfung	161
6.5.1	Vorbereitung der Betriebsmittelmodelle und Fähigkeitserfassung	161
6.5.2	Automatisierte Erfassung von Produkthanforderungen	162
6.5.3	Dreistufiger Abgleich von Anforderungen und Fähigkeiten und Aufbereitung der Baubarkeitsprüfungsergebnisse	163
6.6	Diskussion und Methodenkritik.....	168
6.6.1	Untersuchung der Anforderungserfüllung	168
6.6.2	Kritische Gesamtbetrachtung	177
7	Fazit und Ausblick	179
7.1	Fazit	179
7.2	Ausblick.....	180
8	Literaturverzeichnis.....	183

Abkürzungsverzeichnis

Abbreviations

ACT	Assembly Check Tool
CAD	Computer Aided Design
B48	Baukasten-Vierzylinder-Motor der BMW Group
BMW	Bayerische Motorenwerke
DfA	Design for Assembly
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMU	Digital Mock-up
FS-IFT	Feature Selection and Interpretable Feature Transformation Methode
FTA	Functional Tolerancing and Annotations
IPA	In-Process-Assembly
IPT	Institut für Produktionstechnologie
ISO	Internationale Organisation für Normung
PDM	Produktdatenmanagement
PKT	Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
PLM	Product-Lifecycle-Management
PMI	Product Manufacturing Information
PMM	Produkt-Montage-Morphologie
PU	Produktionsunterbrechung (im Beispiel 2 Wochen produktionsfreie Zeit)
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V.
RVBF	Regelwerk zur Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten
SE	Simultaneous Engineering
SOP	Start of Production / Start der Serienproduktion
SQL	Structured Query Language
TÜ	Technische Überarbeitung
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VR	Virtuelle Realität
WMM	Wärmemanagementmodul

Abbildungsverzeichnis

List of Figures

Bild 1.1: Aufbau der Arbeit in Anlehnung an ULRICH [ULRI84, S. 193]	4
Bild 2.1: Zusammenwirkung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel [MÜLL13a, S. 713]	7
Bild 2.2: Produktentstehungsprozess	12
Bild 2.3: Begrifflichkeiten in dieser Arbeit	14
Bild 2.4: Zeitliche Verteilung der Planungsarbeit [MARC05, S. 38–41]	19
Bild 2.5: Crow's Foot Notation [MOOS04, S. 30–47; GOLL11, S. 337–350]	23
Bild 2.6: Rot-Grün-Vergleich zweier Zylinderkopfmodelle	27
Bild 3.1: Methode zur Clusterung nach BACKHAUS UND REINHART [BACK15b, S. 1792].....	39
Bild 3.2: Betriebsmittelmodule [EILE14, S. 10]	41
Bild 3.3: Aufbau von Produkt und Betriebsmittel in Anlehnung an MÜLLER [MÜLL18a, S. 17].....	42
Bild 3.4: Datenmodell in Anlehnung an MÜLLER ET AL. [MÜLL15]	43
Bild 3.5: Montageorientierter Produktstrukturbaum [LEIS19, S. 76]	44
Bild 3.6: Modell für Montagesysteme nach BACKHAUS UND REINHART [BACK15b, S. 1790]	45
Bild 3.7: Risikomatrix nach BRUNNER [BRUN16, S. 65]	48
Bild 3.8: Methodischer Rahmen zur Entwicklung montagegerechter Produktstrukturen [HALF14, S. 82].....	50
Bild 3.9: Fähigkeitsdarstellung nach KARL [KARL14, S. 54].....	52
Bild 3.10: Product Manufacturing Information an einem Kurbelgehäusemodell.....	58
Bild 3.11: Vergleich eines CAD-Modells ohne (links) und mit (rechts) Konstruktionshistorie	59
Bild 3.12: Shape Distribution Algorithmus in Anlehnung an DOBKIN ET AL. [DOBK19]	60
Bild 3.13: Feature Engineering Methode [TALL18, S. 283]	61
Bild 3.14: Anwendung der Ähnlichkeitssuche nach BERCHTOLD ET AL. [BERC97, S. 159]	61
Bild 3.15: Anforderungs- und Fähigkeitsabgleich nach BACKHAUS ET AL. [BACK17, S. 527]	64
Bild 3.16: Formeln zur Berechnung des J- und M-Koeffizienten.....	66
Bild 3.17: Produkt-Montage-Morphologie nach EILERS [EILE14, S. 85].....	66
Bild 3.18: Heatmap der Variantenkommunalität nach MÜLLER ET AL. [MÜLL17, S. 256].....	68
Bild 4.1: Überblick über die Methodik	80
Bild 5.1: Methode zur Prozessklassifizierung	84
Bild 5.2: Sammlung von Montageprozessstypen.....	85

Bild 5.3: Beispielhafte Betriebsmittelklassifizierung für den Prozesstyp Schrauben	86
Bild 5.4: Bewegungsorientierte Betriebsmitteleinteilung	88
Bild 5.5: Datenmodell für die Methoden zur Softwareunterstützung	90
Bild 5.6: Ablaufplan für die automatisierte Bauzustandserzeugung	92
Bild 5.7: Schlüsselwortmethode	94
Bild 5.8: Farblogik für die Bauzustandserzeugung	97
Bild 5.9: In Montagereihenfolge umsortierter CAD-Strukturbaum	98
Bild 5.10: Methodik zur Rekonfigurationsraumbestimmung	99
Bild 5.11: Ermittlung der betroffenen Betriebsmittel mit geringer Flexibilität	101
Bild 5.12: Definition zu bewertender Rekonfigurations-Szenarien	102
Bild 5.13: Überblick über die Visualisierungsmethode	104
Bild 5.14: Aufbau der Bewegungsrelationsmatrix	105
Bild 5.15: Beispielhafte Grundvisualisierung der Flexibilität von Endeffektoren	106
Bild 5.16: Struktur der Visualisierungsmodelle	108
Bild 5.17: Anmerkungsebenen und Ansichten im Visualisierungsmodell	110
Bild 5.18: Übersichtsmatrix des Regelwerks mit Verweis auf alle Visualisierungsregeln	113
Bild 5.19: Änderungsmanagement des Regelwerkes	116
Bild 5.20: Kinematikdefinition in Unreal Studio mit dem entwickelten Plugin	118
Bild 5.21: Feature Engineering Algorithmus zur Erkennung von Schrauben	120
Bild 5.22: Schritte zur automatisierten Ermittlung des Schraubenkopftyps	121
Bild 5.23: Bewegungssimulation des Betriebsmittels bei der Erreichbarkeitsprüfung	122
Bild 5.24: Algorithmus für die Erreichbarkeitsprüfung	123
Bild 5.25: Transparente Zylinder als Toleranzbereiche bei Schraubspindeln	125
Bild 5.26: Entscheidungsbaum für die Baubarkeitsprüfung	127
Bild 5.27: Kommunalitätsmatrix inklusive Drill-down-Funktion	128
Bild 5.28: Zusammenspiel der Methoden und Modelle	130
Bild 6.1: Vergleich der Abschlussdeckel aus den technischen Überarbeitungen 0 und 1	134
Bild 6.2: Validierungsfall des Wärmemanagementmoduls	134
Bild 6.3: Technische Umsetzung der Methodik bei der BMW Group	136
Bild 6.4: Klassifizierung der Montageprozesstypen in der BMW Group Motormontage	138
Bild 6.5: Häufigkeit der Montageprozesstypen in der BMW Group Motormontage	139
Bild 6.6: Einordnung der Validierungsfälle in die Klassifizierung	140
Bild 6.7: Einteilung des Betriebsmittels zur Verschraubung des Abschlussdeckels	142
Bild 6.8: Schlüsselwortbewertung für das Dressleveltool	144
Bild 6.9: Bewertung der Zuordnungsqualität mit der Schlüsselwortmethode	145
Bild 6.10: Motorbauzustände TÜ0 und TÜ1 an den Stationen RDA210 und RDA400	146
Bild 6.11: Manuelles Korrigieren des Verbauortes	147

Bild 6.12: Mit dem Dressleveltool umsortierter Strukturbaum in CATIA.....	148
Bild 6.13: Steckbrief Produktänderung für den ‚einteiligen Kettentrieb‘	149
Bild 6.14: Unternehmensstrategische Bewertungsszenarien.....	150
Bild 6.15: Bewertung der Stationsflexibilität für die Montagestation RDA210	151
Bild 6.16: Ergebnis der Stationsflexibilitätsbewertung anhand der BMW Group Motormontage.....	152
Bild 6.17: Bewertung der Rekonfigurationsräume hinsichtlich der Szenarien.....	154
Bild 6.18: Struktur des Visualisierungsmodells zur Montage des Abschlussdeckels	156
Bild 6.19: Ansicht Label, Measurement und Tolerance im assoziativen Bauteil	158
Bild 6.20: Anwendung des Visualisierungsmodells und Rekonfigurationsraums	160
Bild 6.21: Kollision der Wärmemanagementmodul-Schraubspindel mit dem Ölfiltermodul.....	161
Bild 6.22: Gefundene Schrauben in dem AssemblyCheckTool	163
Bild 6.23: Ergebnistabelle zur Auswertung der Baubarkeitsprüfung	164
Bild 6.24: Simulation eines erreichbaren Schraubfalls.....	166
Bild 6.25: Übersicht über die Validierungsfälle bei der Baubarkeitsprüfung	167

Tabellenverzeichnis

List of Tables

Tabelle 2.1: Herausforderungen in der proaktiven Produktgestaltung	30
Tabelle 2.2: Herausforderungen in der geometrischen Absicherung	31
Tabelle 3.1: Fähigkeitsparameter für das Sichern [HAMM17, S. 26]	40
Tabelle 3.2: Abgleich der Variantenzahl mit den Anstellgrenzen nach MÜLLER ET AL. [MÜLL17, S. 257]	69
Tabelle 3.3: Forschungslücke für das Handlungsziel A	70
Tabelle 3.4: Forschungslücke für das Handlungsziel B	72
Tabelle 3.5: Forschungslücke für das Handlungsziel C	74
Tabelle 3.6: Forschungslücke für das Handlungsziel D	76
Tabelle 5.1: Parameter zur Bewertung der Stationsflexibilität	100
Tabelle 6.1: Effektivitätsparameter zur Entwicklung von Absicherungsmethoden ..	141
Tabelle 6.2: Fähigkeitsparameter für die Abschlussdeckelverschraubung	143
Tabelle 6.3: Bewegungsrelationsmatrix der Abschlussdeckelverschraubung der BMW Group	155
Tabelle 6.4: Regelwerk zur Visualisierung der Betriebsmittelfähigkeiten (RVBF) ...	157
Tabelle 6.5: geschlossene Forschungslücke zu Handlungsziel A	170
Tabelle 6.6: geschlossene Forschungslücke zu Handlungsziel B	172
Tabelle 6.7: geschlossene Forschungslücke zu Handlungsziel C	175
Tabelle 6.8 geschlossene Forschungslücke zu Handlungsziel D	177

Liste der Teilergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojekts veröffentlichte Teilergebnisse

Müller, R.; Eilers, J.; Hermanns, L. et al.: Modellunterstützte Baubarkeitsprüfung in der Montageplanung: Planungsgenauigkeit bei der Integration von Bauteilvarianten erhöhen, In: wt Werkstatttechnik online, 2017 (Bd. 107), H. 4, S. 253–260.

Gerdes, R.; Poitsch, M.: Prozessgerechte Produktgestaltung und IT-unterstützte Baubarkeitsprüfung in der Motormontageplanung, In: Müller, R. (Hrsg.): Montagetechnik und Montageorganisation, Saarbrücken, ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik, 2018 (Bd. 10).

Im Rahmen des Forschungsprojekts betreute Forschungsarbeiten

Vollack, Björn: Entwicklung einer Methodik zur systematischen Beschreibung und Überwachung montagegerechter Produktanforderungen am Beispiel eines Premium-Automobilherstellers, Bachelorarbeit, 2017.

Greschik, Marc: Entwicklung von Basismethoden zur softwareunterstützten, virtuellen Montageprozessabsicherung in der Produktentwicklungsphase, Bachelorarbeit, 2018.

Holtorf, Florian: Entwicklung einer Methodik zur softwaregestützten, virtuellen Prozessabsicherung in der Montageplanung eines Automobilherstellers, Bachelorarbeit, 2018.

Sauer, Thomas: Entwicklung einer Methodik zur Sicherstellung einer systematischen Beschreibung montagerelevanter Produktanforderungen am Beispiel eines Premium-Automobilherstellers, Bachelorarbeit, 2018.

Knauer, Sebastian: Entwicklung einer systematischen Beschreibung der Fähigkeiten von Betriebsmitteln als Basis einer automatisierten Baubarkeitsprüfung am Beispiel eines Premium-Automobilherstellers, Bachelorarbeit, 2018.

Deuringer, Stefan Peter: Systematik zur Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten und Optimierung der montagegerechten Produktgestaltung, Masterarbeit, 2018.

Thedering, Dennis: Systematische Herleitung von Prozess- und Montagesystemdaten zur virtuellen Prozessabsicherung, Masterarbeit, 2019.

1 Einleitung

Introduction

Zunehmende Kundenorientierung aufgrund der steigenden Individualisierung der Kundenanforderungen und wachsende Internationalisierung der Produktionssysteme und Absatzmärkte erfordern eine stetige und flexible Anpassung des Produktportfolios sowie der Produktionstechnik und erhöhen den Kostendruck auf produzierende Unternehmen [MÜLL13b, S. 251; OBER19, S. 16–18]. Besonders in der Antriebsentwicklung der Automobilindustrie herrscht bedingt durch die zunehmend engere, global vielfältigere und volatilere Regulierung der Abgaswerte von Verbrennungsmotoren und eine restriktivere Zollpolitik eine große Unsicherheit [HORS18; GERD18, S. 6].

Eine Beobachtung des Marktes zeigt, dass insbesondere Hersteller hochklassiger Fahrzeuge darauf mit einer Ausweitung des Produktportfolios und einer starken Individualisierung der Motoren für unterschiedliche Leistungsstufen oder spezifische Nischenmärkte reagieren. In der Produktion erfordert die Sicherstellung der Baubarkeit erhebliche Investitionen zur Aufrechterhaltung der Wandlungsfähigkeit und häufige Stillstände für Umbauten [NYHU08, S. 114–115]. Diese Wirkung ist in der Montage als variantenbildendem Bereich besonders spürbar.

Den steigenden Kosten durch Flexibilisierung des Montagesystems wird unter anderem mit Standardisierung in Form von Plattform- oder Baukastenkonzepten entgegengewirkt [NYHU08, S. 115]. Es werden zum Beispiel montagerelevante Produktmerkmale standardisiert, mit denen bei Neuentwicklungen eine Baubarkeit sichergestellt sein soll [TÜCK15, S. 6].

1.1 Problemstellung

Problem

Die Sicherstellung und Überprüfung der Einhaltung dieser montagerelevanten Produktmerkmale durch die Bauteilentwicklung stellen sich in der Praxis als sehr schwierig heraus. Moderne Produktionssysteme sind weltweit vernetzt und Produktfamilien sind sehr variantenreich, womit häufig eine große Vielfalt der Anlagentechnik einhergeht. [TÜCK15, S. 8]

Bauteilentwickler können nur mit großem Aufwand zu jedem Bauteil in ihrem Verantwortungsbereich die unterschiedlichen im Einsatz befindlichen Montagekonzepte und Fähigkeiten der Betriebsmittel vollständig kennen. Eine Folge dessen ist eine Fokussierung in der Bauteilentwicklung auf die optimale funktionale Auslegung des Bauteils. [KRAU15, S. 10–11]

Liegt ein funktional optimal konstruiertes Bauteil vor, wird die Montierbarkeit meist in aufwändigen Iterationsschleifen zur montagegerechten Produktoptimierung in Zusammenarbeit mit der Montageplanung herbeigeführt. Aufgrund der weit fortgeschrittenen funktionalen Produktauslegung sind Änderungen der Produktgestalt teilweise nicht

mehr möglich. Die montagerelevanten Produktmerkmale können dann nicht mehr vollständig berücksichtigt werden. Das kann teure Umbauten in der Montage erfordern. [MÜLL13a, S. 702–703]

Wegen des hohen Aufwands für qualitativ hochwertige Merkmalsbeschreibungen kann zudem nicht jedes produktrelevante Merkmal detailliert ausformuliert werden. Zu lange Merkmalslisten mit abstrakten Merkmalsbeschreibungen ermöglichen zudem besonders bei zunehmender Anzahl an Produkt- oder Bauteiländerungen keine schnelle Überprüfung der Einhaltung der produktrelevanten Merkmale. Die Überprüfung der Einhaltung der produktrelevanten Merkmale – die sogenannte Baubarkeitsprüfung – bindet darüber hinaus sehr viel Kapazität der Mitarbeiter der Montageplanung. Sie wird in Computer Aided Design (CAD) Systemen durchgeführt. Dabei werden aufgrund mangelnder Kenntnisse in der Bedienung der komplizierten CAD-Systeme oder hoher manueller Aufwände häufig nur statische Untersuchungen durchgeführt, mit denen lediglich die Erreichbarkeit eines montagerelevanten Punktes untersucht werden kann. Besonders bei einer hohen Anzahl zu prüfender Änderungen werden hohe Anforderungen an die Organisation gestellt, damit die gleiche Prüfung von unterschiedlichen Montageplanern nicht doppelt und auf unterschiedliche Art und Weise durchgeführt wird. Die Erreichbarkeit wird häufig nur anhand eines Vergleichs mit alten Produkten abgeschätzt. Bei detaillierten Untersuchungen bleibt den Montageplanern wenig Zeit zur Entwicklung kosteneffizienter Montagekonzepte oder der montagegerechten Produktbeeinflussung zur Vermeidung oder Minimierung von Baubarkeitskonflikten. [MÜLL17, S. 253–260]

Eine späte Aussagefähigkeit über die Baubarkeit und daraus resultierende Kostenauswirkungen von Produktänderungen führen zu langsamen Entscheidungswegen und hemmen die Reaktionsfähigkeit des Unternehmens auf neue externe Einflüsse. Da diese externen Einflüsse jedoch schnelle Entscheidungen zur Realisierung eines neuen Produktprojektes erfordern, sinkt die Qualität von Aussagen über technische Baubarkeitskonflikte. Folglich werden Kostenbewertungen ungenauer. Risikoaufschläge bei Kostenbewertungen senken die Rentabilität von Produktänderungen, sodass Innovationen gebremst werden. Baubarkeitskonflikte werden teils zu spät festgestellt, sodass keine montagegerechte Anpassung des Produktes mehr möglich ist oder langwierige Optimierungsschleifen rechtzeitige Produktanläufe gefährden. Das führt zu Verspätungen im Produktprojekt oder massiven Investitionen zur schnellen Anpassung der Anlagentechnik in der Montage. [VDI87]

Zusammenfassend gibt es zwei Kernprobleme. Erstens die mangelnde Transparenz in der Bauteilentwicklung über technische Lösungen der Montage und somit die Fähigkeiten der Betriebsmittel. Dadurch ist den Bauteilentwicklern nicht immer bekannt, wie das Produkt montagegerecht konstruiert werden kann, sodass Baubarkeitskonflikte auftreten. Zweitens ist die Baubarkeitsprüfung ein sehr aufwändiger Prozess mit hohen manuellen Anteilen, der aufgrund der steigenden Variantenzahl und hohen Vernetzung im Produktionssystem entweder nicht in der notwendigen Detailtiefe durchgeführt werden kann oder bei detaillierter Prüfung die Produktintegration verlängert.

1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung

Scientific Questions and Targets

Mit der vorliegenden Arbeit sollen zur Lösung der zwei Kernprobleme Methoden entwickelt werden, die durch Softwareunterstützung bei der proaktiven Produktgestaltung in der Bauteilentwicklung und bei der geometrischen Absicherung in der Montageplanung unterstützen. Betrachtungsumfang soll die Integration neuer Produkte in bestehende Montagelinien sein.

Die zu beantwortenden Forschungsfragen lauten:

- 1) *Kann mittels Softwareunterstützung im Produktentstehungsprozess eine Effektivitätssteigerung der proaktiven montagegerechten Produktgestaltung zur Vermeidung von Baubarkeitskonflikten erreicht werden?*
- 2) *Kann mittels Softwareunterstützung im Produktentstehungsprozess eine Effizienzsteigerung und Standardisierung erzielt werden, die eine schnellere geometrische Absicherung mit konstanter Qualität ermöglicht?*

Es sollen phasenadäquate Lösungen gefunden werden, die die montagerelevanten Produktmerkmale zur richtigen Zeit in einer geeigneten Granularität und intuitiv verständlichen Form für die Entwickler bereitstellen. Dafür ist die komplette Produktentwicklung von der Vorentwicklung bis zur Serienentwicklung zu berücksichtigen. So sollen Restriktionen und Freiheitsgrade der Montagebetriebsmittel bereits in den ersten Konstruktionsentwurf des Produktes einfließen, sodass Baubarkeitskonflikte möglichst von Beginn an vermieden werden.

Sobald die Montageplaner einen ersten Konstruktionsentwurf eines Bauteils als CAD-Modell erhalten, sollen sie mittels einer Softwarelösung dabei unterstützt werden die Baubarkeit des Bauteils möglichst automatisiert absichern zu können. Zielsetzung dessen ist die schnelle Identifikation der Baubarkeitskonflikte sowie eine Standardisierung der Absicherung, um eine gleichbleibende Qualität der Absicherungsergebnisse zu erhalten. Dies soll bewirken, dass Montageplaner mehr Zeit für das Entwickeln kosteneffizienter Montagelösungen finden und früher montagegerechte Produktoptimierungen mit den Bauteilentwicklern diskutieren können. Durch die besser aufbereiteten Ergebnisse der Baubarkeitsprüfung soll die Qualität von Kostenbewertungen durch geringere Risikoaufschläge bei Baubarkeitskonflikten steigen. Zudem soll eine Verkürzung der Bewertungszeit erreicht werden, wenn keine Baubarkeitskonflikte vorliegen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Structure of the Thesis

Die Forschungsschwerpunkte der vorliegenden Arbeit in der montagegerechten Gestaltung der Produkte und der Optimierung der geometrischen Absicherung verfolgen praktische Zielsetzungen und sind als Handlungswissenschaft zu bezeichnen. Somit sind sie in das Feld der Realwissenschaften einzustufen [ULRI76, S. 305–306]. Für

Realwissenschaften entwickelt ULRICH eine Forschungsmethode, die als Grundlage für die Strukturierung dieser Arbeit dient [ULRI84, S. 192–195]. Die Struktur der Arbeit ist in Bild 1.1 dargestellt.

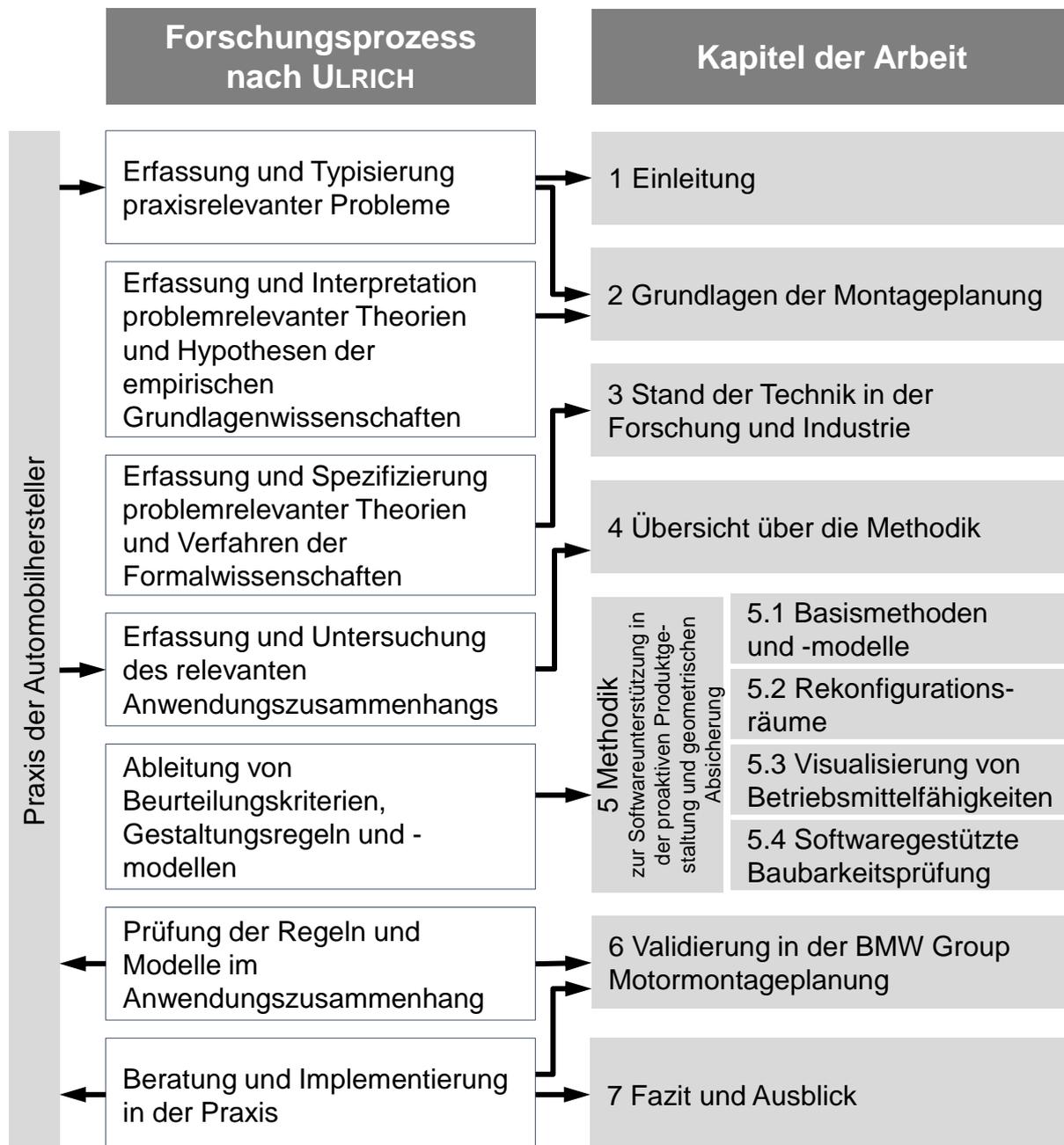


Bild 1.1: Aufbau der Arbeit in Anlehnung an ULRICH [ULRI84, S. 193]

Structure of the Thesis Following ULRICH

Nachdem in Kapitel 1.1 und 1.2 die praxisrelevanten Probleme beschrieben und Forschungsfragen für diese Arbeit daraus abgeleitet wurden, werden in Kapitel 2 die grundlegenden Begrifflichkeiten der Montageplanung und die in dieser Arbeit verwendeten methodischen Grundlagen erläutert. Die Begriffsdefinitionen erlauben im Anschluss eine Ausdetaillierung der Ziele in Form von Anforderungen (Kapitel 2.5). Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 problemrelevante Theorien und Verfahren auf ihre

Eignung zur Erfüllung dieser Anforderungen untersucht. Als Ergebnis dieser Untersuchung wird eine Forschungslücke festgestellt (Kapitel 3.5). Daraus werden die erforderlichen konkreten Handlungsbedarfe im relevanten Anwendungszusammenhang der Großserienmontage abgeleitet. In Kapitel 4 und 5 werden die vorhandenen Theorien und Verfahren um neue Modelle und Methoden erweitert. Aufbauend auf notwendigen Grundüberlegungen und -modellen werden eine Methode zur Erstellung von vereinfachten Betriebsmittelvisualisierungen zur proaktiven montagegerechten Produktgestaltung und eine Methode zur softwaregestützten Baubarkeitsprüfung entwickelt. Dabei wird jeweils dargestellt, wie Softwarelösungen dabei unterstützen können Produktintegrationen zu beschleunigen und die Qualität bei der Integrationsbewertung zu erhöhen. Zur proaktiven Produktgestaltung wird ergänzend eine Methode vorgestellt, wie bereits in der Vorentwicklungsphase Rekonfigurationsräume der Montagebetriebsmittel im Produktentwicklungsprozess berücksichtigt werden können, sodass die Integrationsaufwände möglichst minimal gehalten werden können.

Die entwickelten Methoden und Modelle werden in Kapitel 6 in der Bauteilentwicklung und Montageplanung von Verbrennungsmotoren der BMW Group validiert. Daran schließt sich eine Diskussion der Ergebnisse sowie der verwendeten Methoden an.

Abschließend wird in Kapitel 7 die in der Einleitung gestellte Forschungsfrage beantwortet und es werden Möglichkeiten für weitere Forschungsarbeiten herausgearbeitet, mit denen sich die Wirkung der entwickelten Methodik weiter erhöhen lässt.

2 Grundlagen der Montageplanung

Basics of assembly planning

In diesem Kapitel werden zunächst die grundlegenden Begrifflichkeiten beschrieben (Kapitel 2.1), die zum Verständnis der Modellerarbeitung in den weiteren Kapiteln erforderlich sind. Darüber hinaus werden Grundlagen zu den verwendeten Methoden beschrieben (Kapitel 2.2). Die theoretische Betrachtung wird in Kapitel 2.3 um die praktische Prozessbeschreibung der Produktentstehung in der Industrie ergänzt. Die Begriffsdefinitionen und praktischen Betrachtungen erlauben eine Konkretisierung der Problemstellung (Kapitel 2.4) und Ausdetaillierung der Ziele in Form von Anforderungen an die vorliegende Arbeit (Kapitel 2.5).

2.1 Begriffliche Grundlagen

Basic Terms

Dieses Kapitel beginnt mit einer Übersicht über die grundlegenden Begriffe im Rahmen des Produktentstehungsprozesses (Kapitel 2.1.1). Anschließend wird der Ablauf des Produktentstehungsprozesses beschrieben (Kapitel 2.1.2) und die Montageplanung darin eingeordnet sowie ihre Aufgaben definiert (Kapitel 2.1.3). Die im Rahmen der Arbeit relevanten Aufgaben der Montageplanung werden in den Kapiteln 2.1.4 und 2.1.5 detailliert erläutert.

2.1.1 Produkt, Betriebsmittel und Montageprozess

Product, Resource and Assembly Process

Die grundlegenden Objekte, mit denen sich die Montageplanung befasst, sind das Produkt, der Montageprozess und das Betriebsmittel (Bild 2.1). Diese stehen in Zusammenhang zueinander. Die Begriffe werden im Folgenden spezifiziert.

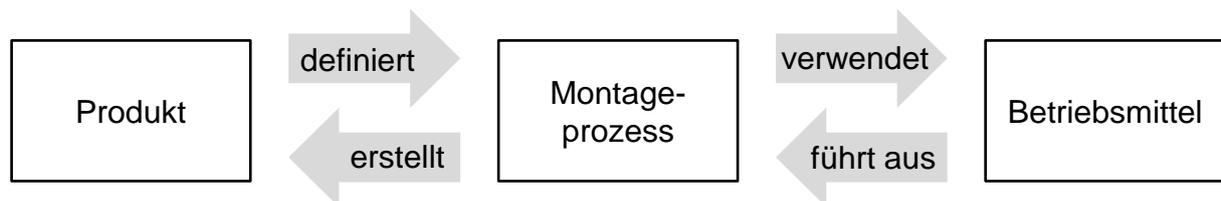


Bild 2.1: Zusammenwirkung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel [MÜLL13a, S. 713]

Connections of product, process and resource

Produkt

Das Produkt wird im Gabler Wirtschaftslexikon als das „Ergebnis der Produktion“ [LEX113, S. 351] definiert. Es wird durch ein Unternehmen als materielles Gut, immaterielles Gut oder Energieleistung auf dem Markt angeboten. Aus Sicht des Kunden stellt das Produkt ein Mittel zur Bedürfnisbefriedigung dar. [LEX113, S. 351]

Diese Definition findet sich in der Literatur häufig in ähnlicher Form wieder [CORS16, S. 9; KOTL07, S. 659; KIST02, S. 18; RAPP99, S. 8].

In dieser Arbeit werden materielle Güter betrachtet. Materielle Güter können aus einzelnen Bauteilen, Baugruppen und Modulen zusammengesetzt werden. Durch Kombination mehrerer Bauteile werden Baugruppen gebildet, die wiederum zu Modulen kombiniert werden können. [MÜLL13a, S. 714–715]

Bauteile werden im Konstruktionsprozess durch die Verknüpfung einzelner geometrischer Elemente (z. B. Gewinde, Fläche) definiert. Wenn geometrische Elemente „Bereiche von besonderem Interesse“ [VDI16] an einem Bauteil beschreiben, werden sie Feature genannt. [VDI16]

Ein Feature kann kontextabhängig mittels entsprechender Klassen von Eigenschaften beschrieben werden [DEUS98, S. 46]. Features für die Montage werden auch als montagerelevante Produktmerkmale bezeichnet (vgl. S. 10).

Während seines Lebenszyklus ist ein Produkt häufig Änderungen unterworfen. Auslöser für diese Änderungen sind primär angepasste Kundenanforderungen an das Produkt, angepasste gesetzliche Regelungen oder technische Innovationen. Zusätzlich kann eine Produktänderung realisiert werden, um die Produktion des Produktes zu vereinfachen oder seine Qualität zu verbessern. [STEI96, S. 4; STAR10, S. 380]

Betriebsmittel

Zur Herstellung eines Produktes kommen Produktionsfaktoren zum Einsatz [BAUE15, S. 8]. Das sind Ressourcen wie Kapital, Menschen, Material, Energie, Betriebsmittel, Informationen und Wissen [WEST06, S. 5; BAUE15, S. 91; LEXI13, S. 352]. Nach WIENDAHL ET AL. stellen alle Montageeinrichtungen Betriebsmittel dar [WIEN14, S. 157].

In der VDI-Richtlinie 2815 Blatt 5 sind Betriebsmittel als „Anlagen, Geräte und Einrichtungen, die zur betrieblichen Leistungserstellung dienen“ [VDI78, S. 2] definiert. EVERSHEIM UND KLOCKE definieren Betriebsmittel als Werkzeuge, Vorrichtungen und Sondermaschinen, die eine spezielle Aufgabenstellung erfüllen sollen [EVER98, S. 1]. HESSE ET AL. beschreiben Betriebsmittel analog dazu mit dem Fokus auf die Montage als Objekte zur Realisierung von Montageaufgaben in Montagestationen [HESS12, S. 1]. In der VDI-Richtlinie 2860 werden technische Einrichtungen, die eine Montagefunktion bzw. Montageprozesse ausführen können, als Funktionsträger bezeichnet [VDI90, S. 14–15]. NYHUIS ET AL. bezeichnen sie als Handhabungsoperatoren [NYHU13, S. 48]. KLUGE und EILERS verwenden mit anlagengestalterischer Perspektive den Begriff „Prozessmodul“ für Objekte, die Montageaufgaben ausführen [KLUG11, S. 83; EILE14, S. 10].

Aus konstruktionstechnischer Sicht können Betriebsmittel als Produkte verstanden werden. In der Literatur werden sie auch als technische Gebilde oder technische Systeme bezeichnet. Ein technisches Gebilde erfüllt technische Aufgaben und wird auch

mit den Begriffen Anlage, Apparat, Maschine, Gerät, Baugruppe, Maschinenelement oder Einzelteil bezeichnet. [FELD13, S. 238; CONR13, S. 51]

Je nach Betrachtungsperspektive und wissenschaftlicher Domäne werden die Begriffe mit unterschiedlicher Abgrenzung zueinander verwendet. Alle Definitionen haben gemein, dass Objekte zur Erfüllung einer Aufgabe beschrieben werden. In dieser Arbeit wird analog HESSE ET AL. das Betriebsmittel als Objekt zur Realisierung von Montageaufgaben verstanden, da das Umfeld dieser Arbeit die Montageplanung ist [HESS12, S. 1].

Ein Betriebsmittel gliedert sich in ein Produktionssystem ein. Dazu finden sich verschiedene Begriffshierarchien und -strukturen. Das gesamte Produktionssystem wird nach BAUER in Fertigungssysteme, Montagesysteme und Transportsysteme aufgeteilt [BAUE15, S. 9]. Ein Montagesystem oder synonym eine Anlage [MÜLL18a, S. 17] bildet alle Montageaufgaben ab [EVER89, S. 55] und besteht aus Montagestationen bzw. -zellen [MÜLL18a, S. 17–31].

Häufig sind Änderungen an den Produkten, die mit den Betriebsmitteln montiert werden, oder neue zu montierende Produkte der Wandlungstreiber für eine Betriebsmitteländerung. Insbesondere Geometrieänderungen haben in vielen Fällen eine Auswirkung auf die mechanische Gestaltung der Betriebsmittel. Alternativ können Betriebsmitteländerungen für geänderte produktionstechnische Anforderungen wie z. B. eine verkürzte Taktzeit, eine erhöhte Produktqualität oder kostengünstigere Montage erforderlich werden. [EILE14, S. 17–18]

Produktänderungen können verschieden starke Auswirkungen haben. Es kann zum Beispiel sein, dass für eine Produktänderung keine Anpassung des Betriebsmittels erforderlich ist. Weiterhin kann es sein, dass die Produktänderung sich innerhalb der mechanischen Flexibilität des Betriebsmittels bewegt, sodass nur eine softwareseitige Anpassung erforderlich ist. Wenn eine größere Anpassung des Montagesystems erforderlich ist, wird von einer Rekonfiguration gesprochen. Eine Montagestation oder ein Stationsmodul sind wandlungsfähig, wenn sich an ihnen „Rekonfigurationsmechanismen“ umsetzen lassen, mit denen auf Wandlungstreiber reagiert werden kann [EILE14, S. 67]. Eine Rekonfiguration führt somit zu einer Erweiterung oder Änderung des Lösungsraumes für die Produktentwicklung. Ein erweiterter Lösungsraum wird in der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an EILERS als Rekonfigurationsraum definiert.

Montageprozess

Das Gabler Wirtschaftslexikon definiert den Produktionsprozess als ein „technologisch, zeitlich und örtlich bestimmtes Zusammenwirken der Produktionsfaktoren zur Herstellung einer bestimmten Gütermenge“ [LEXI13, S. 354]. Die Montage stellt neben der Fertigung ein Teilsystem der Produktion dar [MÜLL13a, S. 702]. Demnach ist das Ergebnis der Montageprozesse ein Produkt und als Input des Prozesses werden Produktionsfaktoren, also unter anderem Betriebsmittel, benötigt. Damit beschreibt der Montageprozess, wie in Bild 2.1 (S. 7) dargestellt, die Wechselwirkungen zwischen

Produkt und Betriebsmittel [MÜLL13a, S. 713]. In der ingenieurwissenschaftlichen Literatur werden Montageprozesse als Sequenz von Montagefunktionen beschrieben [LOTT12, S. 2; WANG09, S. 272; SELI14, S. 119].

Diese Sequenz wird auch als Prozesskette oder Vorrangfolge bezeichnet [MÜLL13a, S. 712]. Dafür wird jeweils ein spezifischer Vorgänger eines anderen Prozesses definiert [DANG03, S. 359]. Ein Vorranggraph beinhaltet darüber hinaus „die für die Planung vorliegenden Freiheitsgrade“ [MOTZ15, S. 7], also alle möglichen Vorgänger und Nachfolger eines Prozesses [PONN11, S. 445].

MÜLLER fasst diese Definitionen zusammen, indem er beschreibt, dass während des Montageprozesses das „Produkt zusammengebaut, in Betrieb genommen sowie dessen Funktion geprüft“ [MÜLL13a, S. 702] wird. In Anlehnung an DIN 8593 [DIN03] und das Vorgehen von LOTTER UND WIENDAHL [LOTT12, S. 2] definiert er das Handhaben [VDI90], Fügen [DIN03], die Inbetriebnahme sowie Hilfsprozesse und Sonderoperationen als grundlegende Montageprozesse. [MÜLL13a, S. 704]

LOTTER UND WIENDAHL bezeichnen diese als Montagegrundfunktionen [LOTT12, S. 2]. Montagegrundfunktionen sind „lösungsneutral“ [BAUE15, S. 23], also sowohl produkt- als auch betriebsmittelunabhängig. Jede Festlegung bestimmter Produkteigenschaften kann jedoch zu direkten Restriktionen für die Gestaltung des Betriebsmittels führen und umgekehrt.

Mit fortschreitendem Lebenszyklus eines Produktes nimmt die Vernetzung von Produkt und Betriebsmittel und damit die Anzahl der Restriktionen zu. Zu Beginn der Produktentwicklung besteht lediglich ein grobes Modell der Produktstruktur. Dieses wird in eine erste Anlagenstruktur übersetzt. Mit fortschreitender Zeit steigt der Reifegrad des Produktmodells, sodass die Montageverfahren und Handhabungstechnik ebenfalls eindeutig definiert werden können. [LOTT12, S. 20]

Mit dieser zunehmenden Verfeinerung der Produkt- bzw. Betriebsmittelstruktur können auch die montagerelevanten Produktmerkmale definiert werden, die ein Betriebsmittel abdecken muss, damit der Montageprozess durchgeführt werden kann. Montagerelevante Produktmerkmale sind „Kategorien für die Eigenschaften eines Produktes“ [SCHU12, S. 336]. Sie werden auch als Anforderungen bezeichnet und können unterschiedliche Ausprägungen annehmen, also unterschiedlich realisiert werden [SCHU12, S. 336; MÜLL15, S. 554]. Andererseits stellt ein bestehendes Betriebsmittel produktrelevante Montagemerkmale oder Fähigkeiten bereit, um die Montage eines Produktes durchzuführen. [BRUN16, S. 7; MÜLL15, S. 554]

Prozesse können manuell, automatisiert oder in hybrider Montage, also einer Kombination aus manuellen und automatisierten Prozessen, realisiert werden. Da automatisierte Betriebsmittel weniger Flexibilität als der Mensch aufweisen, steigt die Anzahl der bereits festgelegten Fähigkeiten mit zunehmender Automatisierung [WIEN14, S. 187]. Das bewirkt in der Montageplanung mehr Aufwand für die geometrische Absicherung, da bei neuen Produkten für mehr Merkmale die Kompatibilität zu den Betriebsmitteln geprüft werden muss.

Aufgrund der Lösungsneutralität der Prozesse haben Änderungen an den Betriebsmitteln oder Produkten nicht immer Auswirkungen auf die Prozesse. Auslöser für Anpassungen der Prozesse können dennoch z. B. Änderungen im Vorranggraphen, die durch eine Produktänderung bedingt werden, oder qualitätsbedingte Änderungen des Betriebsmittels sein, die einen zusätzlichen Scanprozess zur Bauteilrückverfolgung erfordern. Zudem kann eine Produktänderung dazu führen, dass Prozessschritte entfallen oder neue hinzukommen, wodurch Anforderungen an die Betriebsmittel erforderlich werden können. [FELD13, S. 237–238, 257]

2.1.2 Produktentstehungsprozess

Product Development Process

Die Montageplanung und Bauteilentwicklung, die die primären Betrachtungsfelder dieser Arbeit darstellen, sind Teilschritte des Produktentstehungsprozesses (PEP). Häufig aufgegriffene Definitionen des Produktentstehungsprozesses finden sich bei EIGNER UND STELZER, EHRENSPIEL UND MEERKAMM, STARK UND KIND UND WESTKÄMPER UND DECKER [WEST06, S. 118; EIGN09, S. 2; STAR10, S. 380; EHRL17, S. 159–160].

EHRENSPIEL UND MEERKAMM prägen den Begriff der Produkterstellung, die neben dem Produktentstehungsprozess auch die Produktherstellung beinhaltet [EHRL17, S. 159–160; STAR10, S. 380]. Die Produktentstehung beinhaltet die Prozesse zur Produktentwicklung und Produktionsentwicklung [EIGN09, S. 2]. STARK UND KIND beschreiben die einzelnen Teilschritte im Produkterstellungsprozess [STAR10, S. 380]. Es müssen zunächst Anforderungen an das Produkt definiert werden. Daran schließen sich die Produktplanung und die Entwicklung des Produktes an. Darauf aufbauend können die Prozesse geplant werden. Abschließend wird das Produkt produziert. [STAR10, S. 380]

STEINWASSER beschreibt den Produkterstellungsprozess als Produktkreislauf mit Fokus auf die Produkt- und Prozessplanung [STEI96, S. 4]. Er spezifiziert, dass aus dem Markt bzw. vom Kunden Wünsche und Anforderungen abgeleitet werden, aus denen eine Produktidee entsteht. Durch Konstruktion wird ein Produktmodell erstellt. In der Planung der Montageprozesse wird anhand dieses Produktmodells analysiert, welche Montageaufgaben erforderlich sind, und es werden geeignete Ressourcen ausgewählt. Nach einer Phase des Produktionsanlaufs liefert die Produktion fertige Produkte an den Vertrieb, der die Produkte im Markt absetzt. STEINWASSER erläutert mit Verweis auf SCHOLZ-REITER und FELDMANN, dass die einzelnen Prozesse abhängig von vor- und nachgelagerten Prozessen sind [STEI96, S. 5; SCHO91; FELD92]. Insbesondere ist eine Rückkopplung zwischen der Prozessplanung und der Produktplanung in STEINWASSERS Modell ausgewiesen. [STEI96, S. 4–5]

Nicht alle Schritte in den Produktentstehungsprozessmodellen sind eindeutig definiert und werden einheitlich verwendet. Die Aufgaben der Prozessplanung für die Produktionsentwicklung sind eindeutig von der vorgelagerten Phase abgegrenzt. Das Ergeb-

nis der Produktplanung ist eine Produktidee, sodass hier ebenfalls eine Übereinstimmung der Modelle gegeben ist. In der Produktentwicklungsphase werden die Begriffe Entwicklung und Konstruktion in den Modellen von STEINWASSER und STARK UND KIND nicht trennscharf verwendet. EHRENSPIEL UND MEERKAMM unterscheiden die Entwicklung oder Konstruktion als organisatorische Einheit eines Unternehmens und als Tätigkeit [EHRL17, S. 307–311]. Als organisatorische Einheit ist die Entwicklung als übergreifender Bereich zu verstehen, der sowohl die Konstruktion als auch darüber hinausgehende Abteilungen wie den Versuch, den Musterbau, die Berechnung beinhaltet. [EHRL17, S. 307–311]

Bei der Entwicklungstätigkeit werden „ausgehend von Anforderungen die geometrisch-stofflichen Merkmale eines technischen Produkts“ [EHRL17, S. 310] festgelegt. Dabei müssen unterschiedliche, teils gegensätzliche Ziele möglichst optimal realisiert werden. Dies geschieht in Zusammenarbeit mit vor- und nachgelagerten Bereichen wie z. B. Zulieferern oder der Montageplanung. Die Konstruktion entspricht der Umsetzung der Ziele und Anforderungen in einem konkreten Produktmodell. [EHRL17, S. 310]

Weiterhin wird zwischen der Vor- und Serienentwicklung unterschieden. Die Vorentwicklung befasst sich mit der Entwicklung neuer Konzepte und innovativer Lösungen für die Komponenten eines Produktes, entwickelt diese jedoch nicht vollständig bis zur Serienreife. Die Serienentwicklung kann dadurch schnell ein neues Produkt zur Serienreife bringen. [EHRL17, S. 328]

Für diese Arbeit wird der in Bild 2.2 dargestellte stark aggregierte Ablauf des PEP definiert: Die Vorentwicklung definiert grundlegende Produktkonzepte. Für spezifische Produktprojekte werden Anforderungen und Ziele definiert, die durch die Serienentwicklung und Konstruktion in ein Produktmodell übersetzt werden. Dieses Produktmodell dient als wesentliche Eingangsgröße für die Produktionsplanung, die als Synonym zu der Produktionsentwicklung oder Prozessplanung verstanden wird. Es wird grundsätzlich von einer Überschneidung der Phasen ausgegangen.

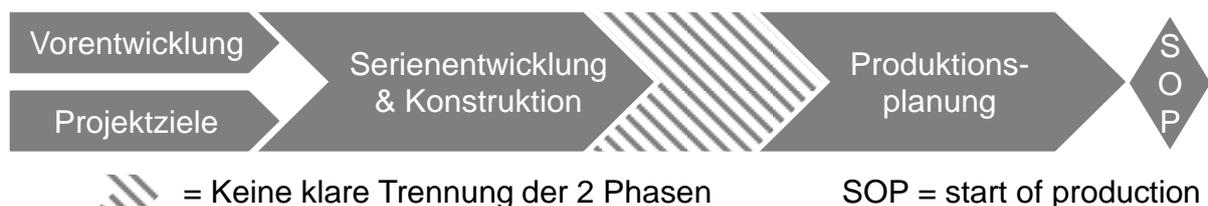


Bild 2.2: Produktentstehungsprozess

Product Development Process

2.1.3 Montageplanung

Assembly Planning

Die Montageplanung stellt den primären Betrachtungsraum für diese Arbeit dar. In den Modellen des Produktentstehungsprozesses kann die Montageplanung neben der

Fertigungsplanung als Teilsystem der Produktionsplanung (vgl. Kapitel 2.1.2) bezeichnet werden. Laut VDI-Richtlinie 2815 ist die Aufgabe der Montageplanung die Gestaltung der Betriebsmittel und Montageabläufe, die für den Zusammenbau des Produktes erforderlich sind [VDI78]. Diese Definition wird in der Literatur in ähnlicher Weise aufgegriffen [FELD97, S. 36; MOHA13, S. 7190].

In der Literatur finden sich verschiedene Vorgehensmodelle zur Planung von Montage- oder Produktionssystemen [BULL86; EVER89; REFA90; LOTT92; GRUN13]. Deren Schwerpunkt ist jeweils anders gesetzt. Grundlegend finden sich aber die gleichen Schritte wieder. Da das Vorgehen des Verbands für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (REFA) sehr häufig in anderen Modellen aufgegriffen wird, wird dieses hier näher beschrieben.

Nach REFA beginnt die Montageplanung mit der Analyse der Ausgangssituation. Darauf basierend wird die Planungsaufgabe konkretisiert. Ist die Zielsetzung eindeutig definiert, wird in einer Grobplanungsphase ein Konzept für das Montagesystem entworfen. Dieses wird im weiteren Verlauf des Planungsvorgehens in einer Feinplanung ausdetailliert und kann schließlich realisiert und eingesetzt werden. [REFA90, S. 89]

Das REFA-Planungsmodell kann auf die beiden primär unterschiedenen Planungsfälle Neu- und Integrationsplanung angewendet werden. Bei der Neuplanung wird das Montagesystem von Grund auf für ein neues Produkt entworfen. Die Gestaltungsmöglichkeiten sind sehr groß, sodass die Neuplanung sich durch einen hohen zeitlichen Planungsvorlauf und die Erreichbarkeit optimaler Prozesslösungen auszeichnet [BULL86, S. 50; EVER89, S. 160; GRUN13, S. 18]. Integrationsplanung wird auch synonym zu den Begriffen Änderungs-, Anpassungs- oder Rekonfigurationsplanung genannt und stellt den engeren Betrachtungsrahmen dieser Arbeit dar. Mit einer Integrationsplanung wird sichergestellt, dass neue oder geänderte Produkte auf bestehenden Montagelinien montiert werden können. [BULL86, S. 50; HOLT00, S. 13–16; BRÜG10, S. 52–59; SCHU12, S. 12; FELD13, S. 713]

Integrationsplanungen erfordern eine verstärkte Zusammenarbeit der Montageplanung mit der Serienentwicklung und Konstruktion [PATR04, S. 9; BAUE15, S. 1; MICH17, S. 582]. Durch vorhandene Montagelösungen wird der Rekonfigurationsraum (vgl. Kapitel 2.1.1), der der Bauteilentwicklung als Lösungsraum zur Verfügung steht, eingeschränkt. So ist zum Beispiel in hochautomatisierten Montagesystemen keine einfache Verlagerung von Automatikstationen möglich, sodass die Prozessreihenfolge im Vorranggraphen viele Restriktionen beinhaltet [BRAC18, S. 299].

In modernen, weltweiten Montagenetzwerken finden sich z. B. aufgrund von Lohnunterschieden oder räumlichen Strukturen der Fabrikhallen verschiedene technische Lösungen für den gleichen Prozess. Es erfordert viel Kommunikationsaufwand, um den Bauteilentwicklern die produktrelevanten Merkmale sämtlicher im Einsatz befindlicher Betriebsmittel zu vermitteln [CHAN12, S. 25]. Deshalb ist im Umfeld der Integrationsplanung die montagerechte Produktbeeinflussung eine wichtige Aufgabe der Montageplanung. Für eine erfolgreiche montagerechte Produktbeeinflussung ist nach

MÜLLER ein tiefes Verständnis des Montageprozesses zwingend erforderlich [MÜLL13a, S. 703]. Dies führt zu einer zunehmenden Vernetzung von Planung und Entwicklung, die in Bild 2.2 durch den schraffierten Bereich dargestellt ist. [FRAN03, S. 1; BOSS07, S. 61–69; MATY09, S. 28; TÜCK11, S. 4; BRUN12, S. 825; BRAC18, S. 325]

Der Begriff der montagegerechten Produktbeeinflussung wird in der Literatur nicht eindeutig von der montagegerechten Produktgestaltung oder Produktoptimierung abgegrenzt. Es kristallisieren sich jedoch zwei grundlegende Verwendungsrichtungen heraus. Einerseits werden proaktive Methoden beschrieben, mit denen Baubarkeitskonflikte von Beginn an in der Produktentwicklung und -konstruktion vermieden werden sollen [BRAC18, S. 324; BRAC18, S. 422; PONN11, S. 444; MÜLL13a, S. 712–713]. Diese werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit unter dem Begriff der proaktiven Produktgestaltung zusammengefasst. Andererseits werden reaktive Methoden zur Analyse und iterativen Optimierung vorhandener Produktmodelle darunter verstanden [CHAN12, S. 25; BRAC18, S. 297]. Solche Methoden werden in dieser Arbeit als Methoden der iterativen Produktoptimierung bezeichnet. Die Ausrichtung auf die Sicherstellung der Montagegerechtheit wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht bei jeder Verwendung der Begriffe explizit hervorgehoben, sondern generell vorausgesetzt. Die montagegerechte Produktbeeinflussung wird als übergeordneter Begriff für die proaktive Produktgestaltung und iterative Produktoptimierung verstanden (Bild 2.3). Die iterative Produktoptimierung läuft simultan zur Grob- und Feinplanung der Betriebsmittelentwicklung (vgl. Simultaneous Engineering) [EHRL17, S. 275–285; WIEN14, S. 163]. Sie schließt in der Regel mit der Realisierung einer Betriebsmittelanpassung ab, da ein Optimum aus Betriebsmittelanpassung und Produktoptimierung gefunden werden muss [LIND09, S. 14].

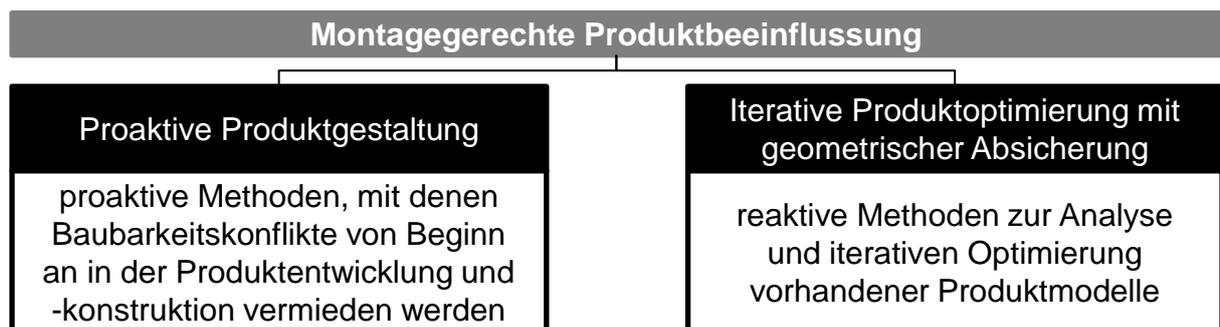


Bild 2.3: Begrifflichkeiten in dieser Arbeit

Terminology in this Thesis

Vor dem Hintergrund häufigerer Produktänderungen (vgl. Kapitel 1) wächst die Bedeutung effizienter Planungs- und Entwicklungsprozesse. Neue oder geänderte Produkte müssen schnell, reibungslos und mit geringem Anpassungsaufwand in das Montagesystem integriert werden. Eine erfolgreiche montagegerechte Produktbeeinflussung kann dazu wesentlich beitragen. Die proaktive Produktgestaltung ist besonders entscheidend, weil die Beeinflussbarkeit der Eigenschaften und Kosten eines Produktes

mit fortschreitendem PEP überproportional stark abnimmt. Andererseits steigt die Beurteilbarkeit und Stabilität der Produkteigenschaften mit zunehmender Produktdetailierung, sodass die Aussagequalität von Produktanalysen für die Produktoptimierung oder Anpassung der Betriebsmittel zunimmt. [WEST06, S. 135; LOTT12, S. 6; EHRL14, S. 13]

In den folgenden Kapiteln werden die grundlegenden Methoden der proaktiven Produktgestaltung (Kapitel 2.1.4) sowie der iterativen Produktoptimierung und Betriebsmittelanpassung (Kapitel 2.1.5) als wesentliche Aufgaben der Montageplanung in der frühen Phase von Produktintegrationsprojekten weiter ausgeführt.

2.1.4 Proaktive Produktgestaltung

Proactive Product Design

Die organisatorische Trennung der Produktentwicklung und Montageplanung hat zur Folge, dass die Montagegerechtigkeit eines Bauteils bei der Konstruktion nicht durchgehend berücksichtigt wird [EHRL17, S. 307]. Die Kernursache dessen ist der hohe erforderliche Aufwand in der proaktiven Produktgestaltung zur Ermittlung und Kommunikation der montagerelevanten Merkmale. Bauteilentwickler verbringen bis zu 30 % ihrer Zeit mit dem Zusammentragen und Verstehen von Informationen über bestehende Produkte und deren Produktionsprozesse [MARC05, S. 38–41; SYAN94, S. 101–115]. Deshalb wurden in den vergangenen Jahren bereits viele Methoden entwickelt, mit denen die Fähigkeiten der Betriebsmittel in den Entwicklungsprozess zurückfließen und der Austausch zwischen Planung und Entwicklung gefördert werden sollen. Es kann zwischen organisatorischen Maßnahmen und methodischer Unterstützung unterschieden werden.

Organisatorische Ansätze zur proaktiven Produktgestaltung

Organisatorische Ansätze sind zum Beispiel das Simultaneous oder Concurrent Engineering, die zusammenfassend auch als Methoden zur integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung bezeichnet werden [PRAS96, S. XXVI; PONN11, S. 439; BAUE15, S. 1]. Das Ziel des Simultaneous Engineering ist es, durch Parallelisierung von Vorgängen, die unabhängig voneinander ausgeführt werden können, schnellere Produktintegrationen zu ermöglichen und engere Zusammenarbeit von Planung und Entwicklung zu erzielen. Während das Simultaneous Engineering primär auf den Produkterstellungsprozess konzentriert ist, wird die gleiche Logik im Concurrent Engineering auf den kompletten Produktlebenszyklus angewendet. [PRAS96, S. XXVI; WEST06, S. 135–137]

Ein Resultat dieser organisatorischen Ansätze in der betrieblichen Praxis sind sogenannte Simultaneous Engineering (SE)-Teams, die sich aus Mitgliedern der verschiedenen Disziplinen (Montageplanung, Entwicklung, Konstruktion, Fertigung, ggf. Bauteillieferant) zusammensetzen und gemeinsam an einer optimalen Lösungsfindung ar-

beiten [RUPP01, S. 3; WIEN10; BRAC18, S. 429]. Ihr Erfolg hängt stark von der Verinnerlichung des prozessorientierten Denkens der Beteiligten ab, da ein Großteil des Wissens über montagegerechte Gestaltung implizit vorliegt und nicht dokumentiert ist [RUPP01, S. 3]. UNGEHEUER weist darauf hin, dass allein die an den Montageabläufen orientierte Strukturierung der Produktmodelle die montagegerechte Produktgestaltung fördert, da so montagerelevante Modularisierungspotentiale ersichtlich werden [UNGE85]. Solche Ansätze können sowohl zur proaktiven Produktgestaltung als auch zur iterativen Produktoptimierung verwendet werden.

Methodische Ansätze zur proaktiven Produktgestaltung

Methodische Unterstützungsansätze zur proaktiven Produktgestaltung sind deutlich vielfältiger. Kernzielsetzungen sind dabei die „Reduzierung der Einzelteile“ [SCHN11, S. 3] und die Sicherstellung der einfachen Montierbarkeit der Bauteile [SCHN11, S. 3]. Die Maßnahmen zur Reduzierung der Einzelteile werden unter dem Variantenmanagement zusammengefasst. Es werden z. B. Gestaltungsrichtlinien definiert, wie die Varianz der einzelnen Bauteile möglichst gering gehalten werden kann, ohne dass die kundenrelevante Produktvarianz wesentlich reduziert wird [MÜLL13a, S. 712–729].

Die begriffliche Unterscheidung zwischen interner und externer Varianz ist ein entscheidendes Werkzeug des Variantenmanagements. Eine hohe externe Produktvarianz ermöglicht ein großes Angebot auf dem Markt und so die Befriedigung vieler unterschiedlicher Kundenbedürfnisse. Gleichzeitig ermöglicht eine geringe interne Bauteilvarianz effiziente Prozesse mit großer Wiederholhäufigkeit. Bauteilvarianz wirkt sich in der Montage als letztem Schritt der Produktherstellung besonders aus, weil die Produktvarianz üblicherweise dort gebildet wird, damit in allen vorgelagerten Prozessen die Varianz möglichst gering bleibt. [MENG01, S. 20]

Produktgruppen, die ein sehr kleines Verhältnis von interner zu externer Varianz aufweisen, werden auch als Baukastenprodukte bezeichnet. Ziel sogenannter Produktbaukästen ist eine hohe Wiederverwendung der Teile. Durch unterschiedliche Kombination der gleichen Bauteile kann trotzdem eine hohe externe Varianz erreicht werden. Ein Beispiel hierfür stellt der BMW Group-Baukastenmotor dar. Die Reihenmotoren der BMW Group weisen 30% bis 40% Gleichteile zwischen Otto- und Dieselmotoren auf [CIUP14]. Dadurch werden Skaleneffekte in den unterschiedlichen Unternehmensbereichen erreicht. Die Abnahmemengen einzelner Bauteilvarianten sind hoch, wodurch geringere Einkaufspreise erzielt werden. Der Entwicklungsaufwand und die erforderliche Anzahl technischer Prototypen sind deutlich geringer als bei herkömmlichen Produktstrukturen. In der Fertigung und Montage muss eine deutlich geringere Bauteilvarianz beherrscht werden, wodurch die Anlagen- und Prozesskomplexität gering und die Sicherstellung der Qualität vergleichsweise einfach ist [KRAU15, S. 8–11]. Bei anderen Automobilherstellern finden sich ähnliche Ansätze [TÜCK15, S. 6].

Für die Auslegung von Montageprozessen und -betriebsmitteln ist neben der Anzahl der Bauteilvarianten zusätzlich die geometrische Beschaffenheit des Produktes entscheidend. Diese gibt zum Beispiel vor, wo das Bauteil gegriffen werden kann oder wo

die Montagebetriebsmittel das Bauteil verschrauben müssen. Diese Art montagerelevanter Merkmale wird auch als geometrische Anforderungen an das Montagesystem bezeichnet. Im weiteren Verlauf wird der Begriff der Anforderungen primär für geometrische Anforderungen verwendet, da der Fokus in der vorliegenden Arbeit auf die geometrische Integrationsfähigkeit gelegt werden soll. [MÜLL17, S. 253–259]

Als allgemeingültige Lösungsansätze ohne direkten Bezug zu speziellen Montagebetriebsmitteln werden Regelwerke und Gestaltungsrichtlinien zusammengetragen, die eine montagegerechte Produktgestaltung fördern. In dem Standardwerk *Pahl/Beitz Konstruktionslehre* stellt MÜLLER die wichtigsten Gestaltungsgrundsätze zu montagegerechter Produktgestaltung vor, die vor allem auf den Leitlinien nach SPUR [SPUR86], HESSE [HESS94], KONOLD UND REGER [KONO03] sowie LOTTER UND WIENDAHL [LOTT06] basieren [MÜLL13a, S. 712–725]. Eine ähnliche Zusammenstellung findet sich bei PONN UND LINDEMANN [PONN11, S. 205–226]. MÜLLER unterscheidet die Regeln zur montagegerechten Produktgestaltung nach den Gliederungsebenen des Produktes in Gestaltungsregeln für Einzelteile, Baugruppen, Module und Produkte. Als gesonderter Bereich wird wie bei HESSE [HESS06, S. 12–18] explizit die automatisierungsgerechte Produktgestaltung hervorgehoben, die nach MÜLLER zunehmend an Bedeutung gewinnt [MÜLL13a, S. 723–724]. [MÜLL13a, S. 712–725]

Als Erweiterung dieser allgemeingültigen Regelwerke können die Ansätze zur Bildung von Baukästen analog zu den Produktbaukästen auf geometrische Merkmale übertragen werden [TÜCK15, S. 4–7]. Bei Verbrennungsmotoren ist die Variation nach Zylinderzahl und Verbrennungsart (Otto / Diesel) beispielsweise kundenrelevant und entspricht somit der externen Varianz. Bei der BMW Group beträgt jedoch der Abstand zwischen zwei Zylindern bei Otto- und Dieselmotoren einheitlich 91 mm [STE15, S. 117]. Dies erlaubt eine grundlegende Standardisierung in der Fertigung der Kurbelgehäuse sowie der Montagebetriebsmittel wie zum Beispiel beim Fügen der Kolben oder bei der Montage der Abgasturbolader und Sauganlagen.

Solche betriebsmittel- und prozessorientierte Standardisierungen werden bei der Volkswagen AG als modularer Produktionsbaukasten und bei der BMW Group als Prozessbaukasten bezeichnet [TÜCK15, S. 6]. Während der modulare Produktionsbaukasten primär einen Baukasten mit technischen Lösungen zur Realisierung für Prozesse darstellt, zielen die Prozessbaukästen darauf ab mittels Standardisierung montagerelevanter Merkmale am Produkt die Grundlage für eine Standardisierung der Betriebsmittel zu erreichen [TÜCK15, S. 6; BRUN16, S. 66]. Merkmale in den Prozessbaukästen werden zwischen Entwicklung, Einkauf und Produktion vereinbart und müssen auch bei neuen Produkten unverändert realisiert werden, um Skaleneffekte zu erreichen. Abweichungen von Prozessbaukastenmerkmalen müssen auf hoher Managementebene genehmigt werden. [TÜCK15, S. 6]

Die Dokumentation in Prozessbaukästen ist primär textuell. Es werden Restriktionen statt Fähigkeiten für die Produktgestaltung definiert. BRUNNER definiert Produktmerk-

male, die bei Änderung geringe Auswirkungen an den Montagebetriebsmitteln bewirken, als geeignet für Standardisierung [BRUN16, S. 65]. Die Standardisierung solcher Merkmale führt jedoch dazu, dass die Entwicklung in den Freiheitsgraden eingeschränkt wird. Zudem ist der Pflegeaufwand für textuelle Beschreibungen hoch, was zu inkonsistenten Daten und Missverständnissen führt [MICH17, S. 582].

Das Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie (IPT) hat hierzu eine Studie in der fertigen Industrie veröffentlicht, die zeigt, dass die Vorgaben für die Konstruktion primär digital kommuniziert werden. Zumeist erfolgt dies in Form von Wikis (vgl. Prozessbaukasten), oder Musterbaugruppen (vgl. Produktbaukasten), die insbesondere für Norm- und Wiederholteile verwendet werden [BOOS18, S. 15]. Die Kommunikation wird bei 42% der befragten Unternehmen ergänzt um mündliche Vorgaben. Insbesondere die Verwendung von Musterbaugruppen impliziert, dass die Sichtweise der Produktion schon in Produktmerkmale übersetzt wird. Das hat zur Folge, dass in der Entwicklung wenig Prozessverständnis vorhanden ist.

Im Laufe der Produktentwicklung nimmt der Detaillierungsgrad des Produktes stetig zu [LOTT12, S. 20]. Die beschriebenen Ansätze betreffen primär die Serienentwicklung, da eine Detailtiefe vorausgesetzt wird, wie sie erst in der Konstruktionsphase vorliegt. Für die Vorentwicklung können beispielsweise Methoden wie die Produktstrukturierung nach UNGEHEUER oder DAHL sowie der PKT-Ansatz des Instituts für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) der Universität Hamburg-Harburg angeführt werden (siehe Kapitel 3.2.2) [UNGE85; DAHL90; KIPP10, S. 1–12; BLEE10, S. 1–10]. HALFMANN ET AL. entwickeln basierend auf der PKT-Methode eine Methode, die gezielt die montagegerechte Produktstrukturierung in der Vorentwicklungsphase adressiert [HALF14, S. 149]. Sie stellen analog zu LOTTER UND WIENDAHL die These auf, dass konstruktive Elemente erst in späteren Phasen der Produktentwicklung beeinflusst werden können [HALF14, S. 149; LOTT12]. Das trifft bei Neuplanungsfällen zu. Bei Integrationsplanungen sind jedoch auch in der Vorentwicklung schon die Montagebetriebsmittel bekannt, die im Optimalfall für die Montage neuer Produktkonzepte weiterverwendet werden [MICH17, S. 583]. Methoden zur Berücksichtigung vorhandener Betriebsmittel in der Vorentwicklung oder zur proaktiven, systematischen Entwicklung von Restriktionen für die Serienentwicklung auf Basis von Produktkonzepten aus der Vorentwicklung konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden.

2.1.5 Iterative Produktoptimierung

Iterative Product Optimization

Entscheidend für die Analyse der Ausgangssituation nach REFA (vgl. Kapitel 2.1.3) ist eine stabile Datenbasis. Wesentlicher Bestandteil der Datenbasis für die iterative Produktoptimierung ist die Beschreibung des Produktes in Form von Produktbaukästen und CAD-Modellen. Die Qualität dieser Daten über neue oder geänderte Produkte ist jedoch sehr instabil [MÜLL15, S. 554]. Aufgrund der kürzeren Produktlebenszyklen müssen sie sehr schnell erzeugt werden, wodurch sie ungenauer werden. Zusätzlich

ändern sie sich häufig [MÜLL15, 553], da die Unsicherheiten und Volatilität im Unternehmensumfeld steigen. Analysen der Auswirkungen der Produktänderungen nehmen in der Montageplanung sehr viel Zeit in Anspruch [MÜLL17, 253], sodass im Laufe dieser Zeit bereits aktuellere Produktmodelle vorliegen können. Zudem werden durch aufwändige Untersuchungen in diesem ersten Schritt der Montageplanung die Kapazitäten der Montageplaner gebunden. Dies zeigt auch die Auswertung der Zeitanteile im Planungsprozess von MARCZINSKI (Bild 2.4), nach der der Aufwand für Dokumentation und Informationsbeschaffung 50 % der Arbeitszeit der Planer in Anspruch nimmt [MARC05, S. 38–41]. So bleiben laut MARCZINSKI lediglich 20% der Zeit in nachfolgenden Prozessschritten für die kreative Entwicklung von Lösungen für Baubarkeitskonflikte [MARC05, S. 38–41]. Das Ergebnis der Analyse der Ausgangssituation ist aber zwingender Input für diese nachfolgenden Planungsschritte.

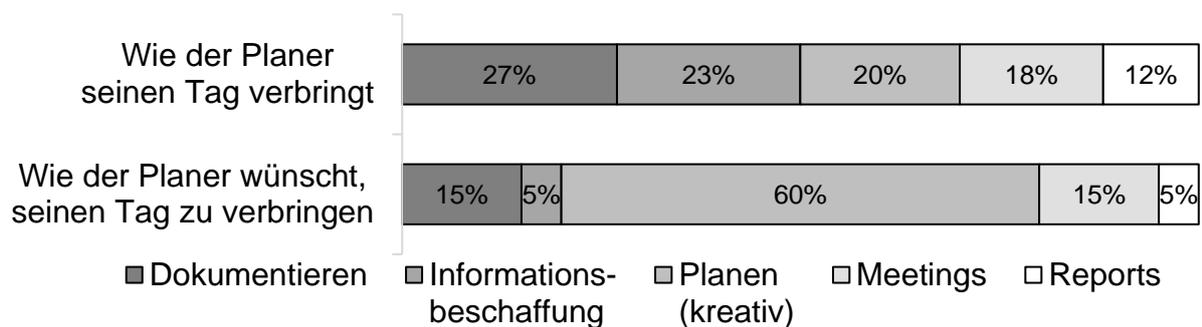


Bild 2.4: Zeitliche Verteilung der Planungsarbeit [MARC05, S. 38–41]

Time Distribution of the Planner's Work

In der Literatur wird synonym zur Produktanalyse der Begriff Absicherung verwendet. Die Baubarkeit neuer oder geänderter Produkte auf bestehenden Montageanlagen wird abgesichert. Neben der Absicherung von Qualitäts-, Funktions- und Ergonomieaspekten müssen für die Absicherung der Montage geometrische Untersuchungen vorgenommen werden. Geometrische Absicherungen stellen somit ein Teilgebiet der Produktanalyse dar. Sie kann sowohl virtuell, also mit digitalen Werkzeugen, als auch mit Hardware-Prototypen erfolgen. [WACK10, S. 48]

Organisatorische Ansätze zur iterativen Produktoptimierung

Organisatorisch dient neben dem Simultaneous oder Concurrent Engineering (vgl. 2.1.4) in der industriellen Praxis besonders das Produktgespräch als Maßnahme zur virtuellen Absicherung des Produktes im Montageprozess. Einganggröße für ein Produktgespräch sind die Ergebnisse der Produktanalyse. Das Produktgespräch wird genutzt, um Baubarkeitskonflikte zu diskutieren und bereichsübergreifend optimale Lösungen zu entwickeln. Dafür wird die Montage jedes einzelnen Bauteils und jeder Baugruppe anhand virtueller Modelle der Anlagen und des Produktes von Produktentwicklern und Produktionsplanern gemeinsam besprochen. [BRAC18, S. 298–300]

Methodische Ansätze zur iterativen Produktoptimierung

Als methodischer Ansatz kann das Modell zur fähigkeitsbasierten Montageplanung von MÜLLER ET AL. angeführt werden [MÜLL15, S. 554]. Sie leiten dieses aus dem Modell von REFA [REFA90] in Kombination mit den Modellen von LOTTER [LOTT92] und KLUGE [KLUG11] ab. Auch sie identifizieren als kritischen Prozessschritt der Montageplanung die virtuelle Absicherung. Diese teilen sie weiterhin ein in die folgenden Schritte, die durch eine Änderung am Bauteil ausgelöst werden:

- Betroffene Prozesse ermitteln
- Betroffene Stationen ermitteln
- Abgleich von Anforderungen und Fähigkeiten. [MÜLL15, S. 554]

Die ersten beiden Schritte befassen sich mit übergeordneten, systembeschreibenden Daten wie der Linienbelegung, also der Zuordnung von Produktvarianten zu Montagelinien, auf denen sie montiert werden. Im dritten Schritt werden sehr konkrete Repräsentationen des Produktes und der Betriebsmittel benötigt. Zur Ermittlung der betroffenen Prozesse und Stationen entwickeln MÜLLER ET AL. ein Datenmodell, das auch den Abgleich von Anforderungen und Fähigkeiten ermöglicht (vgl. Bild 3.4, S. 43). Für den Fall, dass ein Baubarkeitskonflikt auftritt, identifizieren MÜLLER ET AL. drei mögliche Stellhebel. Es kann entweder eine Anpassung der Linienbelegung, eine montagegerechte Optimierung des Produktes oder eine Anpassung der Betriebsmittel vorgenommen werden. [MÜLL15, S. 554]

In einer weiterführenden Publikation identifizieren sie als offene Fragestellungen insbesondere die Automatisierung der geometrischen Absicherung im Rahmen der Baubarkeitsprüfung [MÜLL17, S. 259]. Als entscheidender Teilschritt der iterativen Produktoptimierung, in dem viel Kapazität der Montageplaner gebunden wird, soll die geometrische Absicherung deshalb im Vordergrund der weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit zur iterativen Produktoptimierung stehen.

Die Zielsetzung aktueller Forschungen in diesem Bereich ist es, die stark manuell geprägten Prozessketten mittels Automatisierung zu einer virtuellen Absicherung zu entwickeln [MICH17; MÜLL17]. Die dazu erforderlichen Methoden und Modelle sowie unterstützende Werkzeuge fallen in den Bereich der Digitalen Fabrik [BRAC18, S. 419]. Ihr Ziel ist unter anderem ein „durchgängiges Datenmanagement“ [BRAC18, S. 419] als Basis für 3D-Simulationen und -Visualisierungen der Prozesse und Betriebsmittel in Verbindung mit dem Produkt. Dadurch sollen die Planung und Evaluierung der Fabrik digital unterstützt werden und es sollen stetig Verbesserungspotentiale ermittelt werden können. [BRAC18, S. 419]

Somit sollen mit den Methoden und Werkzeugen der digitalen Fabrik die Arbeitsinhalte der Planer von der Dokumentation und Informationsbeschaffung hin zur tatsächlichen Planungsleistung verlagert werden (vgl. Bild 2.4). Die Verbindung von Produkt- und Prozessdaten ist wesentlicher Bestandteil der Digitalen Fabrik. Die dafür erforderlichen

3D-Visualisierungen der Produkte werden als Digital Mock-up (DMU) bezeichnet. Analog dazu werden die 3D-Repräsentationen der Produktionssysteme als Fabrik-DMU bezeichnet. Für die Absicherung muss das Produktmodell vorbereitet werden. Die Angabe der Vorrangfolge wird verwendet, um den Bauzustand des Produktes im jeweiligen Montageschritt virtuell darzustellen. [BRAC18, S. 14]

BRACHT ET AL. beschreiben diesen schrittweisen Zusammenbau des Produktes als manuellen Teilprozess der geometrischen Absicherung [BRAC18, S. 306]. Auch HALFMANN ET AL. empfehlen die „Visualisierung von Produktstruktur und Montagereihenfolge“ [HALF14, S. 30] und nennen Werkzeuge zur Unterstützung dieses Prozesses wie Fügematrizen und Checklisten. Darüber hinaus nutzen HALFMANN ET AL. das Produkt-DMU für eine „systematisierte Analyse der Bauteilkonstruktion“ [HALF14, S. 29] als Basis für die Identifikation von Optimierungsmöglichkeiten für das Produkt. Anhand eines Bauzustandsmodells können zum Beispiel Fügepfade, Montagezeiten und ergonomische Aspekte analysiert werden. Durch Ergänzung des Fabrik-DMU wird diese Analyse um die geometrische Absicherung automatisierter Montagestationen erweitert. Diese erfordern besondere Betrachtung, da sie „Fixpunkte in der Struktur des Montagebandes“ [BRAC18, S. 299] darstellen.

Neben den Analysemethoden existieren viele systematische Ansätze zur Bewertung der Montagegerechtigkeit von Produkten. Ein wichtiger Vertreter dieser Bewertungsansätze ist die Design for Assembly (DfA) Methode. Darin wird nicht beschrieben, wie der tatsächliche Abgleich von Produkt- und Betriebsmittelmodellen erfolgt, sondern vielmehr, wie die Ergebnisse einer solchen Analyse interpretiert und verwendet werden können, um die montagegerechte Produktgestaltung zu fördern. [BOOT05]

Neben der Dokumentation und Informationsbeschaffung sind insbesondere Besprechungen und die Erstellung und Ablieferung von Berichten sehr zeitaufwändig in der Montageplanung (vgl. Bild 2.4). Besonders das Berichtswesen nimmt mehr als doppelt so viel Zeit in Anspruch, wie durch die Planer als sinnvoll erachtet wird (Bild 2.4).

2.2 Methodische Grundlagen und Werkzeuge

Methodical Basics and Tools

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Methoden, Modelle und Werkzeuge vorgestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit angewendet werden. Zum besseren Verständnis werden zunächst die Begriffe Methode, Methodik und Modell voneinander abgegrenzt (Kapitel 2.2.1). Darauf folgend werden die Clusteranalyse und Klassifikation als Methoden zur Systematisierung eines Problems vorgestellt (Kapitel 2.2.2). Des Weiteren werden Datenbanken und -modelle erklärt (Kapitel 2.2.3). In Kapitel 2.2.4 wird auf die Visualisierung mittels CAD eingegangen. Die beschriebenen Themen werden nur im Ansatz erläutert, um ein einheitliches Verständnis in dieser Arbeit zu ermöglichen. Für ein tiefergehendes Verständnis wird die Auseinandersetzung mit der weiterführenden Literatur empfohlen.

2.2.1 Klärung der Begriffe Methode, Methodik, Modell und Werkzeug

Explanation of the Terms Method, Methodology, Model and Tool

Methoden sind regelbasierte und planmäßige Vorgehensweisen, die beschreiben wie Aufgaben ausgeführt werden müssen und welches Ergebnis der Tätigkeit geplant ist [LIND09, S. 57–58]. Umfassendere Sammlungen von Methoden, die zur Lösung eines Problems verwendet werden, werden als Methodik bezeichnet [LIND09, S. 58]. Während Methoden und Methodiken „präskriptiv[en]“ [LIND09, S. 57] Charakter besitzen, sind Modelle primär deskriptiv. Nach STACHOWIAK weist der Modellbegriff drei Merkmale auf. Das Abbildungsmerkmal besagt, dass Modelle immer ein Original repräsentieren, das als Vorbild für das Modell dient. Durch das Verkürzungsmerkmal wird ausgedrückt, dass ein Modell Zusammenhänge oder Attribute des Originals nur teilweise abbildet. Zuletzt ist durch das pragmatische Merkmal definiert, dass ein Modell immer für einen bestimmten Zweck eingesetzt wird. [STAC73, S. 131–133]

Sowohl Modelle als auch Methoden werden in der Praxis auch als Werkzeuge bezeichnet. Im engeren Sinne werden Werkzeuge als Mittel (z.B. Rechnerprogramme) zur Realisierung von einer oder mehreren Methoden definiert [SCHN99, S. 303]. In dieser Arbeit wird dem engeren Werkzeug-Begriff gefolgt.

2.2.2 Clusteranalyse und Klassifikation

Cluster Analysis and Classification

Clusteranalyse- und Klassifikationsverfahren dienen der Gruppierung von Objekten zur Komplexitätsreduktion und Schaffung von Übersicht, um so das Verständnis eines großen Anwendungsbereiches zu vereinfachen [EHRL17, S. 38–40].

Bei Clusteranalyseverfahren werden einzelne Objekte anhand von Attributen beschrieben. Sind die Ausprägungen dieser Attribute bei zwei oder mehreren Objekten ähnlich, können sie zu einem Cluster zusammengefasst werden [GAUS14, S. 63–66]. Eigenschaften der Objekte sind innerhalb eines Clusters folglich homogen und zwischen Clustern heterogen [BACH10, S. 15–18].

Bei der Klassifikation wird ein zur Clusteranalyse gegensätzlicher Ansatz angewendet. Statt von den Objekten auszugehen, werden erst Klassen gebildet, denen die Objekte anschließend zugewiesen werden. Ihr Vorteil ist die größere Planbarkeit und ein geringerer Beschreibungsaufwand [HEES17, S. 68]. Nachteil ist, dass Gruppen mit geringerer Homogenität erreicht werden. [BACH10, S. 15–18]

2.2.3 Datenbanken und Datenmodelle

Databases and Data Models

Um klassifizierte Daten maschinenlesbar zu machen, ist eine informationstechnische Abbildung erforderlich [KITS14, S. 31]. Datenmodelle dienen zur Beschreibung von Zusammenhängen und Attributen von Objekten. Konkrete Objekte werden auch als

Entität, also „individuelles, unterscheidbares und identifizierbares Exemplar von Dingen, Personen oder Begriffen“ [MOOS04, S. 11] bezeichnet.

Eine Menge von Entitäten wird als Klasse bezeichnet. Beispielsweise können bei einem Automobilhersteller die verschiedenen Fahrzeugmodelle der Klasse Produkt zugeordnet werden. Entitäten werden mit Attributen beschrieben und Attribute haben Ausprägungen. Einem Fahrzeugmodell kann z. B. das Attribut Sitzanzahl und die Ausprägung fünf zugewiesen werden. Zwischen Entitäten verschiedener oder der gleichen Klasse können Beziehungen vorliegen. Diese werden in Beziehungsmengen aggregiert. Beispielsweise kann eine Beziehung bedeuten, dass Fahrzeugmodelle (Entität 1) in verschiedenen Märkten (Entität 2) angeboten werden. [MOOS04, S. 19–20]

Datenzusammenhänge können zum Beispiel anhand von Entity-Relationship-Modellen beschrieben werden [MOOS04, S. 9]. Darin werden die Attribute einzelner Klassen aufgeführt und deren Beziehungen zueinander abgebildet. Bei der Definition der Beziehungen muss eine Aussage darüber getroffen werden, mit wie vielen Entitäten einer anderen Klasse die Entitäten der betrachteten Klasse in Beziehung stehen können. Es gibt verschiedene Notationen zur grafischen Darstellung dieser sogenannten Multiplizität [MOOS04, S. 30–47]. In dieser Arbeit wird die Crow's-Foot-Notation verwendet, deren Symbolik in Bild 2.5 erklärt wird.

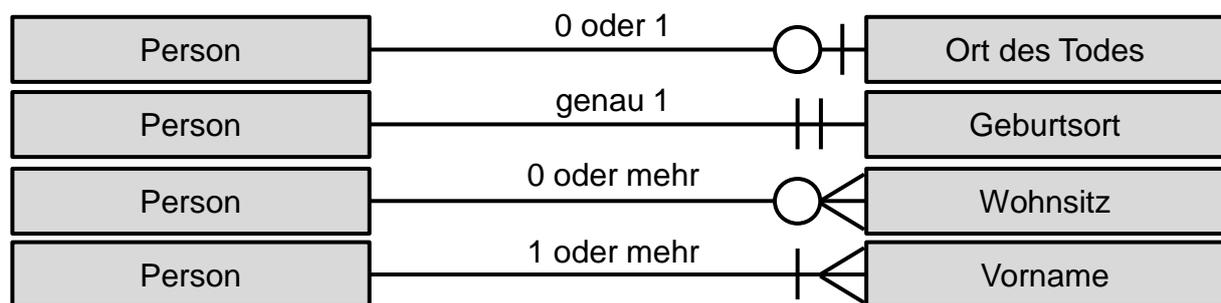


Bild 2.5: Crow's Foot Notation [MOOS04, S. 30–47; GOLL11, S. 337–350]

Crow's Foot Notation

Datenbanken sind Werkzeuge zur informationstechnischen Verarbeitung der Datenmodelle und Speicherung großer Datenmengen. Während Datenmodelle die Zusammenhänge der Klassen und Attribute darstellen, werden in Datenbanken die einzelnen Entitäten und Ausprägungen gespeichert. Es wird unter anderem zwischen relationalen und objektorientierten Datenbanken unterschieden. Relationale Datenbanken bilden einzelne Klassen in einzelnen Tabellen ab und stellen Beziehungen entweder über eindeutige Schlüsselattribute dar oder verwenden Zwischentabellen zur Abbildung mehrdimensionaler Beziehungen. Objektorientierte Datenbanken bauen hingegen auf Objektmodellen auf. Darin werden die Struktur und das mögliche Objektverhalten definiert, sodass alle dem Objekt zugehörigen Informationen objektgebunden verfügbar sind. Um Informationen aus einer Datenbank abzufragen, werden Abfragesprachen verwendet. Eine sehr häufig verwendete Abfragesprache für relationale Datenbanken ist die Structured Query Language (SQL). [WAGN12, S. 95–122; LUST89, S. 53–133]

2.2.4 Computer Aided Design (CAD)

Computer Aided Design

Es existieren verschiedene Werkzeuge zur Erzeugung, Darstellung und Analyse von CAD-Modellen. In der Entwicklung und Konstruktion werden hauptsächlich CAD-Konstruktionssysteme verwendet. Deren großer Funktionsumfang erfordert einen hohen Grad an Wissen für die korrekte Bedienung. [SIND14, S. 343–345]

CATIA ist eines der am häufigsten verwendeten CAD-Konstruktionssysteme [BOOS18, S. 14]. Deshalb werden im weiteren Verlauf die entwickelten Lösungen mit der Anwendung von CATIA validiert (vgl. Kapitel 6).

Laut internationaler Automobilverbände gibt es pro Datenerzeuger 20 Datenkonsumenten für 2D- oder 3D-Konstruktionsdaten [AUTO05]. Deshalb existieren einfacher gestaltete Viewer für CAD-Modelle, die primär auf schnelle Betrachtungen der Modelle und einfache Analysen wie Vermessungen ausgelegt sind. Lizenzkosten für Viewer sind deutlich niedriger als die von Konstruktionssystemen. [SIND14, S. 344–345]

Es gibt verschiedene Lösungen zur Abbildung dreidimensionaler Daten. Tesselierte Modelle wie in den Formaten *.stl oder *.fbx beschreiben die CAD-Daten mittels einfacher Geometrien wie z. B. Dreiecken. Gebogene Oberflächen oder Konturen lassen sich damit nur näherungsweise abbilden. Die Kantenlänge der Dreiecke definiert die Genauigkeit der Modelle. Weiterhin existieren Flächenmodelle (z.B. *.stp) und Volumenmodelle (z. B. *.igs). [BOOS18, S. 14]

Das für die Umsetzung einer digitalen Fabrik geforderte „durchgängige Datenmanagement“ [BRAC18, S. 419] wird durch die breite Systemlandschaft aus Viewern und Konstruktionssystemen erheblich erschwert. Die Geometriebeschreibung in proprietären Formaten der Konstruktionssysteme enthält neben Geometrieinformationen häufig auch weiterführende Informationen wie die Konstruktionshistorie. [SIND14, S. 337]

Der Austausch von CAD-Daten zwischen verschiedenen Betrieben in der Lieferkette wird somit nur über Austauschformate möglich. Das im Werkzeugbau am meisten genutzte Austauschformat für CAD-Daten ist gemäß einer Studie des Fraunhofer IPT das Step-Format (*.stp). Nachteil der Konvertierung in dieses Format ist der Verlust von Meta-Informationen, wie Einfärbungen der Bauteile oder Anmerkungen [BOOS18, S. 21].

2.3 Entwicklungs- und Montageplanungsprozesse in der Industrie

Development and Assembly Planning Processes in the Industry

Zur Ermittlung der Herausforderungen bei der proaktiven Produktgestaltung und geometrischen Absicherung werden repräsentativ die Prozesse der BMW Group in der Montageplanung für Verbrennungsmotoren betrachtet. Die Ausführungen in diesem Kapitel beziehen sich auf diesen Anwendungsfall. Es werden zunächst die Prozesse in der Produktentwicklung und proaktiven Produktgestaltung beschrieben (Kapitel

2.3.1). Anschließend werden die Prozessabläufe in der Montageplanung zur geometrischen Absicherung erläutert (Kapitel 2.3.2).

2.3.1 Proaktive Produktgestaltung in der Industrie

Proactive Product Design in the Industry

Die betrachteten Prozesse in diesem Kapitel sind die Vorentwicklung für neue oder geänderte Produktkonzepte und die Konstruktion in der Serienentwicklung. Die beteiligten Rollen sind die Vorentwicklungsingenieure, die Serienentwicklungsingenieure und Bauteilkonstrukteure, sowie die Montageplaner für den Produktentwicklungsprozess und die Betriebsmittelkonstrukteure.

Neue oder geänderte Produktkonzepte, die in der Vorentwicklung erarbeitet werden, erreichen die Montageplanung häufig erst mit Beginn der Serienentwicklung. Zur frühen Abstimmung in der Vorentwicklung werden bedarfsgerecht Austauschtermine zwischen den Ingenieuren der Vorentwicklung und der Montageplanung durchgeführt. Fokus der Montageplanung liegt aber auf der Integration der Motoren aus der Serienentwicklung, sodass wenig Zeit für die Produktgestaltung in der Vorentwicklung bleibt. Es existiert keine systematische Methode zur frühzeitigen Einbeziehung der Montageplanung bei der Entwicklung neuer Produktkonzepte. Somit ist bei neuen Produktkonzepten eine Einflussnahme der Montageplanung nicht gesichert.

Als Instrument zur Kommunikation der Restriktionen an geänderte Produktkonzepte werden in der Vorentwicklung Prozessbaukästen verwendet [KRAU15, S. 8–11]. Diese sind jedoch an vielen Stellen zu detailliert für die Vorentwicklungsphase und beinhalten keine Priorisierung der Merkmale. Wenn das grundlegende Konzept für eine Funktion noch konzipiert wird, kann die Realisierung geometrischer Vorgaben aus den Prozessbaukästen noch nicht überprüft werden. Der Lösungsraum der Vorentwicklung würde durch die Prozessbaukästen bereits sehr stark eingeschränkt. Zielsetzung für die Vorentwicklung ist aber grundsätzlich das Denken in offenen Lösungsräumen.

Zum regelmäßigen Austausch in der Serienentwicklung zwischen Montage und Entwicklung sowie teilweise mit Bauteillieferanten dienen primär die SE-Teams. Diese finden wöchentlich statt.

Als Werkzeug zur Kommunikation von Vorgaben dienen neben direkten Gesprächen auch in der Serienentwicklung die Prozessbaukästen [KRAU15, S. 8–11]. Prozessbaukästen werden einmalig vereinbart und sind anschließend für jedes neue Motorprojekt gültig. Verletzungen der Prozessbaukästen müssen in einem hohen Gremium freigegeben werden. Prozessbaukästen können im Konstruktionsprozess herangezogen werden. Die Dokumentation der Prozessbaukästen findet in Listenform und textuellen Beschreibungen statt. Deren Pflege ist aufwändig und die textuellen Vorgaben müssen immer interpretiert werden, sodass Missverständnisse aufkommen können. Um dem entgegenzuwirken, werden durch die Betriebsmittelkonstruktion vereinzelt CAD-Modelle der Betriebsmittel auf die bauteilberührenden Schnittstellen reduziert. Alle für ein Bauteil potenziell relevanten Schnittstellen werden in ihrer Arbeitsposition

in ein CAD-Modell kombiniert. Die Flexibilität der Montagebetriebsmittel wird nicht abgebildet. Bei Bauteilen mit wenigen Montageprozessen werden diese durch die Entwicklung als erheblich handhabbarer beschrieben als die Prozessbaukästen. Zur Anwendung dieser Modelle müssen die Bauteilkonstrukteure über ein stark ausgeprägtes Prozesswissen verfügen und die Montagetechnik detailliert verstehen, sowie beispielsweise die Linienbelegung kennen. Diese ist für die Bauteilkonstrukteure jedoch unbekannt, sodass sich die Montagestationen, die das Bauteil montieren, nur über persönliche Rückfragen beim Montageplaner ermitteln lassen.

Der Konstrukteur benötigt darüber hinaus die Information, wie der Bauzustand des Motors ist, wenn das durch ihn konstruierte Bauteil montiert wird. Die Vorrangfolge ist für die Entwickler und Konstrukteure nicht dokumentiert, sodass die Auslegung für den Montageprozess erschwert wird.

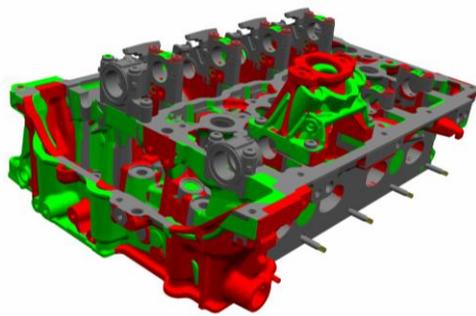
Bei der Konstruktion wird primär die Funktionsauslegung betrachtet, um z. B. Anforderungen an die Leistung, Dauerfestigkeit oder das Gewicht zu erfüllen. Anschließend werden die Schnittstellen zu anderen Bauteilen konstruiert und die Fertigungs- und Verpackungsprozesse abgesichert. Erst im letzten Schritt werden Montage- und Transportprozesse des gesamten Motors oder der Zwischenbaustufen abgesichert.

2.3.2 Geometrische Absicherung in der Industrie

Geometric Validation in the Industry

In diesem Kapitel werden die Tätigkeiten in der Montageplanung im Rahmen der geometrischen Absicherung zur iterativen Produktoptimierung im Industrieumfeld betrachtet. Es werden die Absicherungsprozesse im Rahmen von Kostenbewertungsprozessen bei den Montageplanern für den Produktentstehungsprozess und die Detailbewertungen durch die Betriebsmittelkonstruktion als Vorbereitung für Produktgespräche beschrieben. Die Vorgehensweisen zur Absicherung sind nicht standardisiert und können zwischen verschiedenen Mitarbeitern variieren. Die beschriebenen Prozesse stellen folglich Aggregationen mehrerer persönlicher Vorgehensweisen dar.

Die Montageplaner, die für die Produktbeeinflussung verantwortlich sind, sind neben ihrer Teilnahme im SE-Team und der proaktiven Produktgestaltung verantwortlich für die Kostenbewertung der Auswirkungen von Produktänderungen in der Montage und die Spezifikation der Umbauten zur Integration neuer oder geänderter Produkte in das weltweite Montagenetzwerk. Sie bekommen als Eingangsgröße textuelle Beschreibungen und CAD-Modelle der neuen oder geänderten Motoren. Da sie in der Regel nicht über vertieftes Wissen in CAD-Konstruktionssystemen verfügen, sind sie auf den eingeschränkten Funktionsumfang von CAD-Viewern angewiesen. Für grobe Kostenbewertungen überlagern sie die neuen CAD-Modelle mit Modellen von bereits in der Serienmontage befindlichen Motorvarianten (Beispiel in Bild 2.6).



Geometrie des
alten Bauteils

Gleiche Geometrie

Geometrie des
neuen Bauteils

Bild 2.6: Rot-Grün-Vergleich zweier Zylinderkopfmodelle

Red And Green Comparison of two Models of Cylinder Heads

Anschließend werden analog zu dem Vorgehen von MÜLLER ET AL. die betroffenen Stationen und Prozesse ermittelt [MÜLL15]. Daraufhin können die technischen Auswirkungen der gefundenen Änderungen anhand der CAD-Modelle oder der Spezifikation der Montagebetriebsmittel analysiert werden. Da die Dokumentation der Betriebsmittelmodelle im Fabrik-DMU aufgrund des hohen Pflegeaufwands bei Änderungen nicht immer auf dem aktuellsten Stand ist, erfragen sie bei Unsicherheiten lokale Besonderheiten im Montagesystem des jeweiligen Werkes bei den Montageplanern vor Ort.

Das Motormodell muss für den Abgleich von Bauteil und Betriebsmittel zunächst in den jeweiligen Bauzustand in der betrachteten Station gebracht werden. Dies erfolgt durch manuelles Ausblenden der noch nicht verbauten Bauteile. Die Verbaureihenfolge stellt implizites Wissen der Montageplaner dar. Das virtuelle Hineinladen des neuen Bauzustandsmodells in die bestehende Montagestation wird durch den Umstand erleichtert, dass alle CAD-Modelle der Montagestationen im Koordinatensystem des Motors konstruiert sind. Der Abgleich der Modelle erfolgt über Sichtprüfung. Dazu müssen die montagerelevanten Produktmerkmale wie z. B. Greifflächen ermittelt werden. Bei unterschiedlichen Arbeitspositionen der Betriebsmittel muss eine Verschiebung des Motormodells in dem Stationsmodell vorgenommen werden. Dies ist in den verwendeten Viewern möglich, aber aufwändig. Deshalb werden zusätzliche Untersuchungen bei der Betriebsmittelkonstruktion beauftragt. Eine Rückmeldung der Betriebsmittelkonstruktion kann aufgrund der Arbeitsvorräte in der Betriebsmittelkonstruktion mehrere Tage dauern. Dauert die Bewertung der Betriebsmittelkonstruktion zu lang, werden Risikowerte in die Kostenbewertungen eingetragen. Ist die genaue Auswirkung einer Produktänderung bekannt, werden neue Konzepte für die Betriebsmittel entwickelt. Auf Basis alter Angebote und Erfahrungswerte werden die Kosten Auswirkungen ermittelt und in die Kostenbewertung eingetragen.

Auslöser für Detailbewertungen in der Betriebsmittelkonstruktion können Untersuchungsaufträge aus der Montageplanung oder dem Absicherungsmanagement der Qualitätsmanagementabteilung sein. Wird eine Detailbewertung angefordert, müssen zunächst analog zu MÜLLER ET AL. die betroffenen Montagestationen ermittelt werden [MÜLL15]. Im ersten Absicherungsschritt wird ein Vergleich des neuen Produktes mit

bestehenden Produkten durchgeführt. Werden dabei wesentliche Änderungen identifiziert, werden die CAD-Modelle der Montagebetriebsmittel geladen. Nun muss zunächst wieder der Bauzustand des Motors durch Ausblenden der noch nicht verbauten Bauteile und Baugruppen erzeugt werden.

Für den Abgleich der Betriebsmittelmodelle mit den Motormodellen werden zunächst gedanklich Toleranzen auf die Endeffektoren der Betriebsmittel addiert. Daraufhin wird das Modell visuellen Kollisionsprüfungen zur Ermittlung der Zugänglichkeit unterzogen. Da nur statische, nicht kinematisierte Modelle der Betriebsmittel vorliegen, werden hierfür selten Werkzeuge des CAD-Programms verwendet. Stattdessen werden Expertenabschätzungen durchgeführt. Wird eine Kollision erkannt, oder ein kritischer Bereich erreicht, werden punktuell Messungen durchgeführt, um zu ermitteln, ob es sich tatsächlich um kritische Abstände handelt.

Ist die Kollisionsprüfung abgeschlossen, werden Schnittstellen zwischen Bauteil und Betriebsmittel näher betrachtet. In Abhängigkeit vom Montageprozesstyp und der technischen Realisierung des Betriebsmittels können zum Beispiel folgende Baubarkeitskonflikte auftreten:

- Werkzeug berührt eine Funktionsfläche (z. B. Greifer auf Lagergasse)
- Betriebsmittel erreicht montagerelevantes Produktmerkmal nicht (z. B. Abdichtadapter berührt Dichtfläche nicht)
- Betriebsmittel eignet sich nicht für den Verbau des Bauteils (z. B. falsche Schraubennuss für die Schraube)

Es existieren keine Checklisten oder Arbeitsanweisungen, welche Aspekte je nach Montageprozesstyp zu überprüfen sind. Nach Prüfung der Schnittstellen, werden Drehmomente und Kräfte überprüft. Auf Basis von Erfahrungswerten werden an kritischen Stellen Drehmomentstützen oder Kraftaufnahmebutzen mit der Bauteilentwicklung abgestimmt, um Deformationen oder Torsionen des Bauteils durch Montagebetriebsmittel zu vermeiden. Abschließend werden die Ein- und Ausfahrbewegungen in die Montagestation sowie Verfahrswege des Betriebsmittels überprüft. Gefundene Baubarkeitskonflikte werden per Screenshots in Präsentationen oder per E-Mail dokumentiert und an die Verantwortlichen weitergegeben. Hierfür gibt es keine Standards. So kann es vorkommen, dass alte Untersuchungen nicht wieder auffindbar sind und erneut durchgeführt werden müssen.

Sobald durch Umbauten die Fähigkeiten der Montagebetriebsmittel geändert werden, muss eine Absicherung aller bereits in Serie befindlichen Produkte mit dem neuen oder geänderten Montagebetriebsmittel erfolgen. Diese wird in der Regel aufgrund des immensen zeitlichen Aufwands nur abgeschätzt. So kann es zu Baubarkeitskonflikten der neuen Montagebetriebsmittel mit bestehenden Motormodellen kommen, welche in der Folge erst mit ersten Hardwareaufbauten im Serienband auffallen können.

Eine besondere Herausforderung bei der geometrischen Absicherung stellt die Struktur der CAD-Anlagenmodelle dar. Da die Anlagenlieferanten nicht über das gleiche

CAD-System verfügen, wird ein Austauschformat verwendet, bei dem Metainformationen und teils die hierarchische Struktur der Stationsmodelle verloren geht.

2.4 Zwischenfazit: Herausforderungen in der Theorie und Praxis

Interim Summary: Challenges in Theory and Practice

Die in der theoretischen (Kapitel 2.1 und 2.2) und praktischen (Kapitel 2.3) Betrachtung dargestellten Herausforderungen stimmen weitgehend miteinander überein. Sie werden in Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 zusammenfassend aufgeführt. In der ersten Spalte wird jeweils angegeben, ob die Herausforderung in der Theorie und der Praxis identifiziert wurde. Die zweite Spalte zeigt an, welche Phasen des Produktentstehungsprozesses durch die Herausforderung betroffen sind. In den letzten vier Spalten sind den Herausforderungen die in Kapitel 2.5 definierten Handlungsziele zugeordnet.

In der proaktiven Produktgestaltung zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 ergeben sich folgende Herausforderungen:

Tabelle 2.1: Herausforderungen in der proaktiven Produktgestaltung*Challenges in the Proactive Product Design*

Identifikationsort	Prozessschritt	Herausforderung	A Basismethoden	B Rekonfigurationsräume	C Visualisierung	D Baubarkeitsprüfung
T, P	VE, SE	Späte Einbindung der Montageplanung und späte Berücksichtigung der Montageprozesse	x	x	x	
P	VE	Keine methodische Unterstützung zur integrierten Produkt- und Montagekonzepterstellung		x		
T, P	VE, SE	Großteil des Wissens über montagegerechte Gestaltung liegt nur implizit vor	x		x	
T, P	SE	Missverständnisse und Medienbrüche durch textuelle Aufbereitung produktrelevanter Betriebsmittelmerkmale			x	
T, P	SE	Aufwändige Pflege textueller Aufbereitung produktrelevanter Betriebsmittelmerkmale			x	
P	VE, SE	CAD-Betriebsmittelmodelle erfordern fortgeschrittenes Prozesswissen			x	
T, P	VE, SE	Lediglich Beschreibung von Restriktionen (keine Flexibilität), ohne Begründungen			x	
T, P	VE	Detailgrad der Kataloge mit Restriktionen (z. B. Prozessbaukästen) ist zu hoch		x		
Legende: T = Theorie (Kapitel 2.1), P = Praxis (Kapitel 2.3) VE = Vorentwicklung, SE = Serienentwicklung						

Es zeigt sich, dass keine Unterscheidung der Produktgestaltungsmethoden zwischen der Vor- und Serienentwicklung erkennbar ist. Die Montageprozesse werden im Entwicklungsprozess sehr spät berücksichtigt. Zudem ist die Kommunikationsform von Restriktionen in Textform in der Serienentwicklung nicht handhabbar und schränkt den

Lösungsraum bei der Produktentwicklung zu sehr ein. Kritisch ist auch die verteilte Ablage der Informationen zur montagegerechten Produktgestaltung.

Bei der geometrischen Absicherung zur Beantwortung der Forschungsfrage 2 können folgende Herausforderungen identifiziert werden:

Tabelle 2.2: Herausforderungen in der geometrischen Absicherung

Challenges in the Geometric Validation

Identifikationsort	Prozessschritt	Herausforderung	A Basismethoden	B Rekonfigurationsräume	C Visualisierung	D Baubarkeitsprüfung
T, P	SE, MP	Aufwändige, manuelle Erzeugung des Bauzustands des Produktes	x			
P	MP	Datenverluste bei Konvertierung der Betriebsmitteldaten (keine Struktur und Kinematik)	x			x
T, P	MP	Kein durchgängiges Datenmanagement und aufwändige Pflege der Betriebsmitteldaten	x			x
T, P	SE, MP	Baubarkeitsuntersuchungen sind sehr zeitintensiv (keine Prüfung von Serienprodukten auf neuen Betriebsmitteln)				x
P	SE, MP	Untersuchungsergebnisse stark abhängig von Kenntnissen in CAD-Systemen				x
P	SE, MP	Keine standardisierten Absicherungsschritte und Methoden je Prozesstyp				x
T, P	SE, MP	Keine standardisierte Dokumentation und Ablage von Ergebnissen der geometrischen Absicherung				x
Legende: T = Theorie (Kapitel 2.1), P = Praxis (Kapitel 2.3) SE = Serienentwicklung, MP = Montageplanung						

Zusammenfassend sind die Methoden zur geometrischen Absicherung durch stark manuelles Vorgehen, geringen Standardisierungsgrad und hohen Zeitaufwand geprägt. Die Absicherungsergebnisse sind abhängig von dem Erfahrungs- und Domänenwissen der Planer und Betriebsmittelkonstrukteure.

2.5 Anforderungen an die Arbeit

Requirements to the Thesis

Die in Kapitel 1.2 definierten Forschungsfragen werden durch die aus der Theorie und Praxis ermittelten Herausforderungen (Kapitel 2.4) gestützt. Aufbauend auf den Herausforderungen werden vier Handlungsziele definiert. Das Handlungsziel A fasst übergreifende Methoden und Modelle zusammen. Die restlichen Handlungsziele B, C und D sind in einer zeitlichen Abfolge im Produktentstehungsprozess einzuordnen.

- A) Übergreifend: Basismethoden und -modelle für die Softwareunterstützung im Produktentstehungsprozess (Forschungsfrage 1 & 2)
- B) Methodik zur integrierten Produkt- und Prozessentwicklung durch Beschreibung von Rekonfigurationsräumen (Forschungsfrage 1)
- C) Methodik zur intuitiv verständlichen Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten in CAD (Forschungsfrage 1)
- D) Methodik zur Automatisierung und Standardisierung der Baubarkeitsprüfung (Forschungsfrage 2)

Zu jedem Handlungsziel werden im Folgenden konkrete Anforderungen definiert. Die Anforderungen bilden die Basis für die Strukturierung der nachfolgenden Kapitel.

Übergreifend sind zunächst unterstützende Methoden und Modelle zur Strukturierung der Metadaten wie Vorrangfolgen, Prozesstypen oder Linienbelegungen zu entwickeln. Diese werden als Basismethoden und -modelle bezeichnet (Handlungsziel A). Sie sollen die einfache Wiederverwendung der Daten in der proaktiven Produktgestaltung und geometrischen Absicherung und damit eine Effizienzsteigerung bei der Beschreibung produktrelevanter Betriebsmittelmerkmale ermöglichen. An das Handlungsziel A werden folgende Anforderungen gestellt:

A1 Strukturierung der Prozesse und Betriebsmittel

Bei der Montage eines Produktes und insbesondere bei der Montage unterschiedlicher Produkte wird der gleiche Prozesstyp (z.B. Schrauben) immer wieder ausgeführt. Zudem werden zur Ausführung der gleichen Prozesstypen auch ähnliche Betriebsmittel verwendet. Deshalb müssen Methoden und Modelle entwickelt werden, anhand derer die Montageprozesse und Betriebsmittel strukturiert werden können. Beschreibungen produktrelevanter Betriebsmittelmerkmale und technischer Lösungen des Anlagenbaus können so einmalig definiert werden und für vergleichbare Prozesse und Betriebsmittel wiederverwendet werden. Eine somit einheitlich gültige Definition eines

Montageprozessbegriffes oder einer Betriebsmittelbezeichnung soll die Verknüpfung einer Visualisierung der Betriebsmittelfähigkeiten mit einem Baubarkeitsprüfungsergebnis und Rekonfigurationsräumen ermöglichen. Damit soll eine Durchgängigkeit der weiteren Methoden und Modelle erreicht werden.

A2 Zentrales Datenmodell zur Verknüpfung von Metainformationen über Produkte, Prozesse und Betriebsmittel

Für die proaktive Produktgestaltung und geometrische Absicherung sind grundlegende Datenverknüpfungen erforderlich. Es muss beispielsweise dokumentiert werden können, welches Produkt auf welcher Montagelinie verbaut werden soll oder welches Bauteil an welcher Montagestation verbaut wird. Produktseitig muss gespeichert werden können, welche Bauteilvarianten in einem bestimmten Produkt verbaut werden und welche Anforderungen diese an die Betriebsmittel stellen. Zudem müssen die Fähigkeiten der Betriebsmittel beschrieben werden können. Diese übergreifenden Informationen müssen in einem zentralen Datenmodell abgebildet werden.

A3 Automatische Erzeugung von Bauzuständen des Produktes

Änderungen eines Produktes oder die Entwicklung eines neuen Produktes sind häufiger als Umbauten in einem Montagesystem. Deshalb muss die Vorbereitung der CAD-Produktmodelle für den Abgleich von Produkt und Betriebsmittel automatisiert erfolgen. Sowohl für die Konstruktion von Produkten als auch für die geometrische Absicherung wird als Eingangsgröße der Bauzustand in einem Montageprozess benötigt. Die Ermittlung der Herausforderungen zeigt, dass die Erzeugung dieses Bauzustands Informationen über Bauteile und deren Verbauorte erfordert und mit großem Aufwand verbunden ist. Es sollen Methoden entwickelt werden, anhand derer der Bauzustand eines neuen oder geänderten Produktes automatisiert in CAD erzeugt werden kann und sowohl in CAD-Konstruktionssystemen als auch -Viewern angezeigt werden kann.

Die Steigerung der Effektivität der proaktiven Produktgestaltung (Forschungsfrage 1) kann insbesondere durch phasenadäquate Methodenanwendung bewirkt werden. Dies wird in der Vorentwicklung durch Handlungsziel B und in der Serienentwicklung durch Handlungsziel C erreicht.

In der Praxisbetrachtung zeigt sich, dass die reine Kommunikation von Restriktionen besonders in der Vorentwicklung unwirksam ist. Es müssen Rekonfigurationsräume aufgezeigt werden (Handlungsziel B). Um die erforderlichen Rekonfigurationsräume der Montagebetriebsmittel frühzeitig zu identifizieren, ist eine integrierte Entwicklung von Produkt- und Montagekonzepten anzustreben. Dabei ist darauf zu achten, dass der Aufwand für die Montageplanung aufgrund der Serienferne der Produktkonzepte geringgehalten wird. Für Handlungsziel B sind folgende Anforderungen einzuhalten:

B1 Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen

Es muss eine Methode definiert werden, mit der die Montagestationen und -betriebsmittel ausgewählt werden können, die für die Definition von Rekonfigurationsräumen in Betracht gezogen werden sollen. Dabei soll eine starke Einschränkung der zu betrachtenden Betriebsmittel erfolgen, sodass der Aufwand für die Montageplanung reduziert wird und der Informationsumfang für die Vorentwicklung angemessen ist.

B2 Definition von Rekonfigurationsräumen für die Produktgestaltung

Für die ausgewählten Stationen soll eine Methode definiert werden, mit der die Montageplaner dabei unterstützt werden, frühzeitig neue technische Lösungen zu entwickeln, um neue Produktkonzepte zu realisieren. Daraus sollen Vorgaben für die Produktentwicklung in Form von Restriktionen oder Freiheitsgraden abgeleitet werden, um eine wirtschaftliche Integration zu ermöglichen.

In der Serienentwicklung ist eine stärkere Fokussierung auf die geometrische Ausgestaltung erforderlich. Lange Kataloge mit Restriktionen für die Produkte in textueller Form müssen um eine intuitiv verständliche Kommunikationsform für produktrelevante Betriebsmittelmerkmale ergänzt werden. Den Konstrukteuren sind die Fähigkeiten, also die Flexibilität vorhandener Betriebsmittel in der „Sprache des Entwicklers“ [STEG10, S. 30] – also in CAD-Modellen – aufzuzeigen. Das Handlungsziel C soll durch die Erfüllung der folgenden Anforderungen erreicht werden.

C1 Intuitiv verständliche Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten

Die Visualisierung soll für Bauteilentwickler und -konstrukteure intuitiv anwendbar sein. Es soll möglich sein, ohne Expertenwissen über die Montageprozesse und Betriebsmittelaufbauten, die Betriebsmittelfähigkeiten zu verstehen und Restriktionen und Freiheitsgrade für die Produktgestaltung abzuleiten. Bei der Strukturierung der Visualisierungsmodelle muss die Denkweise der Bauteilentwickler aufgegriffen werden. So soll ein visueller Abgleich von Produkthanforderungen und Betriebsmittelfähigkeiten ermöglicht werden.

C2 Identifikation produktrelevanter Darstellungsinhalte

Es muss untersucht werden, welche Inhalte relevant für die montagegerechte Produktgestaltung sind (vgl. Verkürzungsmerkmal von Modellen). Dabei ist insbesondere darauf zu achten, dass nicht nur Restriktionen festgehalten werden. Es sollen auch Freiheitsgrade abgebildet werden, die den Bauteilkonstrukteuren aufgrund der Flexibilität der Montagebetriebsmittel zur Verfügung stehen. Die Visualisierung soll so als zentraler Ausgangspunkt für alle produktrelevanten Betriebsmittelfähigkeiten und das produktrelevante Montageprozesswissen dienen.

C3 Produktkompatible Visualisierungsmodelle der Betriebsmittelfähigkeiten

Die erzeugten Visualisierungsmodelle der Betriebsmittelfähigkeiten müssen in einem Format erzeugt werden, das ohne Medienbrüche kompatibel zu den dreidimensionalen Produktmodellen ist. Sie müssen in einem CAD-Konstruktionssystem, also in der „Sprache des Entwicklers“ [STEG10, S. 30], erzeugt werden können.

C4 Regelwerk zur strukturierten Erstellung der Visualisierungsmodelle

Es muss ein standardisiertes Vorgehen definiert werden, wie die Visualisierungsmodelle der Betriebsmittelfähigkeiten aufzubauen sind. Dies soll deren Erstellung vereinfachen und weitgehend unabhängig von Expertenwissen ermöglichen. Darüber hinaus soll mit einem zu erstellenden Regelwerk sichergestellt werden, dass die Visualisierungsmodelle untereinander vergleichbar sind und gleichartige Montageprozesse nach dem gleichen Muster visualisiert werden.

Die beiden Handlungsziele B und C sollen bewirken, dass die Produkte montagegerechter gestaltet werden. Es werden sich jedoch nicht alle Baubarkeitskonflikte vermeiden lassen, da die Entwicklung von Produkten immer einem Zielkonflikt aus Produktoptimierung für den Kunden, begrenzten Ressourcen (z. B. Einschränkungen durch vorhandene Betriebsmittel) und Zeitdruck unterliegt [LIND09, S. 14]. Um den Aufwand zur geometrischen Absicherung zu reduzieren und die Ergebnisqualität der Absicherungen zu erhöhen (Forschungsfrage 2), soll mit Handlungsziel D eine Methodik entwickelt werden, die eine Automatisierung und Standardisierung der Baubarkeitsprüfung ermöglicht. Dafür müssen folgende Anforderungen erfüllt sein:

D1 Methode zur Vorbereitung der Betriebsmittelmodelle

Die Betriebsmittelmodelle liegen wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben häufig lediglich als statische Modelle vor. Es soll eine Methode zur Aufbereitung der Modelle entwickelt werden. Damit sollen Betriebsmittelfähigkeiten maschinenlesbar dokumentiert werden. Insbesondere sollen die Bewegungsfreiheitsgrade der Betriebsmittel in die Modelle integriert werden, um dynamischere Untersuchungen zu ermöglichen.

D2 Automatisches Finden von Produkthanforderungen am CAD-Produktmodell

Um einen automatischen Abgleich der Produkthanforderungen mit den Betriebsmittelfähigkeiten zu ermöglichen, müssen die Produkthanforderungen zunächst bekannt sein. Sie sollen automatisch aus den CAD-Produktmodellen hergeleitet werden können, um eine schnelle Baubarkeitsprüfung neuer Produkte zu ermöglichen.

D3 Abgleich von Produkthanforderungen mit Betriebsmittelfähigkeiten

Es soll eine Methode definiert werden, wie der Abgleich von Produkthanforderungen mit Betriebsmittelfähigkeiten standardisiert erfolgen soll. Die Methode soll in Softwaresystemen automatisiert abgebildet werden können. Dabei soll die intuitive Anwendbarkeit

im Vordergrund stehen, sodass wenig Expertenwissen zur Bedienung der Software erforderlich ist.

D4 Standardisierte Aufbereitung der Baubarkeitsprüfungsergebnisse

Die Baubarkeitsprüfungsergebnisse sollen in einer standardisierten Form aufbereitet werden. Dies soll die Montageplaner und Bauteilentwickler dabei unterstützen, schnell Baubarkeitskonflikte zu identifizieren. Die erstellten Auswertungen sollen als Entscheidungsunterstützung für SE-Teams dienen und wiederverwendbar, zentral abgespeichert werden können.

3 Stand der Technik

State of the Art

In diesem Kapitel werden problemrelevante Theorien und Verfahren [vgl. ULR184] für die Handlungsziele zusammengefasst. Die Gliederung dieses Kapitels folgt deshalb der Struktur der Handlungsziele und Anforderungen. Nach der Vorstellung des Stands der Technik wird in Kapitel 3.5 je Handlungsziel die Lücke zwischen Anforderungen und Stand der Technik ermittelt.

3.1 A) Basismethoden und -modelle

Basic Methods and Models

In diesem Abschnitt werden zunächst Basismethoden und -modelle für die Softwareunterstützung im Produktentstehungsprozess erläutert. Es werden Klassifizierungsmodelle für Prozesse und Betriebsmittel sowie eine Methode zur Strukturierung von Montageprozessstypen vorgestellt (Kapitel 3.1.1 und 3.1.2). In Kapitel 3.1.3 werden Datenmodelle zur Strukturierung der Metadaten für die Montageplanung verglichen und in Kapitel 3.1.4 werden Methoden zur Erzeugung des Bauzustands erläutert.

3.1.1 Strukturierung von Montageprozessstypen

Structuring of Assembly Processes

Bei dem Aufbau von Klassifizierungen der Montageprozessstypen wird üblicherweise von den Montagegrundfunktionen ausgegangen. Basis der Beschreibungen in der Literatur sind primär die VDI 2860 und DIN 8593, in denen die Begriffe Montage- und Handhabungstechnik sowie Fügen behandelt werden. Die VDI 2860 zur Montage- und Handhabungstechnik wurde im Juni 2016 ersatzlos gestrichen. Aufgrund ihrer Funktion als Basis für viele Modelle der wissenschaftlichen Literatur wird sie an dieser Stelle trotzdem erwähnt. Im Folgenden werden verschiedene Modelle zur Strukturierung der Prozessbegriffe vorgestellt. [VDI90; DIN03]

Prozessmodell nach LOTTER UND WIENDAHL

Als Grundfunktionen des Montierens nennen LOTTER UND WIENDAHL die Funktionen „Fügen“, „Handhaben“, „Kontrollieren“, „Justieren“, sowie „Sonderoperationen“ [LOTT12, S. 2]. Die Einteilung der Grundfunktion Fügen in ihre Montageprozessstypen (z. B. Zusammensetzen, Füllen) ist aus der DIN 8593 übernommen [DIN03, S. 1]. In der VDI-Richtlinie 2860 wird das Kontrollieren dem Handhaben zugeordnet [VDI90, S. 2]. Dies übernehmen LOTTER UND WIENDAHL, führen das Kontrollieren jedoch zusätzlich als eigene Montagegrundfunktion auf [LOTT12, S. 2]. Die Zuordnung aller weiteren Teilfunktionen des Handhabens übernehmen LOTTER UND WIENDAHL aus der VDI 2860 [VDI90, S. 4]. Dies sind zum Beispiel „Speichern“, „Bewegen“ und „Sichern“ [VDI90,

S. 4–6]. Als eigene Montagegrundfunktion führen LOTTER UND WIENDAHL das „Justieren“ ein [LOTT12, S. 2]. Die Teilfunktionen des Justierens „Justieren durch Umformen“ und „Justieren durch Trennen“ sind an die Hauptgruppen der Fertigungsverfahren gemäß DIN 8580 angelehnt [DIN74, S. 7]. Alle weiteren Prozesstypen ordnen LOTTER UND WIENDAHL der Montagegrundfunktion „Sonderoperationen“ [LOTT12, S. 2] zu.

Prozessmodell nach MÜLLER

Wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben referenziert MÜLLER bei der Beschreibung seines Prozessmodells auf LOTTER UND WIENDAHL sowie die Norm DIN 8593. Er übernimmt in seiner Einteilung die Grundfunktionen Handhaben, Fügen und die Sonderoperationen. Das Handhaben wird abweichend von der VDI 2860 in Zuführen, Transportieren und Sichern unterteilt [MÜLL13a, S. 705]. Das Zuführen und Transportieren entspricht dem Bewegen nach LOTTER UND WIENDAHL. Beim Fügen wird die Einteilung aus der Norm DIN 8593 übernommen. Lediglich das Kleben und Löten wird als ein Prozesstyp zusammengefasst. Statt der Grundfunktionen des Kontrollierens und Justierens verwendet MÜLLER jedoch die Begriffe Inbetriebnahme und Hilfsprozesse. Der Inbetriebnahme ordnet er neben dem Parametrieren und der Funktionsprüfung das Justieren als Teilfunktion zu. Das Kontrollieren ordnet MÜLLER als Hilfsprozess ein. Weitere Hilfsprozesse sind das Erwärmen und Kühlen, die bei LOTTER UND WIENDAHL als Sonderoperationen eingeordnet sind sowie das Menge verändern und Speichern, die bei LOTTER UND WIENDAHL Teilfunktionen des Handhabens sind [LOTT12, S. 2]. [MÜLL13a, S. 705]

Den Sonderoperationen ordnet MÜLLER das Nacharbeiten zu, was LOTTER UND WIENDAHL unter dem Begriff Nachbehandeln als Teilprozess des Justierens aufführen [LOTT12, S. 2; MÜLL13a, S. 705].

MÜLLER erhebt mit seinem Modell ausdrücklich keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr lässt er insbesondere bei den Fügeprozessen, Hilfsprozessen und Sonderoperationen die Erweiterung offen. [MÜLL13a, S. 705]

Prozessmodell und -methode nach BACKHAUS ET AL.

BACKHAUS UND REINHART beschreiben eine Methode zur Identifikation der Fähigkeiten in einem Montagesystem. Diese unterteilen sie in zwei grundlegende Schritte. Im ersten Schritt muss eine generelle Fähigkeitsstruktur entwickelt werden, die im zweiten Schritt für den Anwendungsfall durch empirische Ergänzung spezifiziert werden kann. Sie verwenden folglich zunächst eine grundlegende Klassifizierung und erweitern diese anwendungsgerecht durch Clusterung der Betriebsmittel. BACKHAUS UND REINHART verwenden die Begriffe *Fähigkeiten* und *Prozesse* nicht entsprechend dem Verständnis dieser Arbeit. Prozesse werden bei BACKHAUS UND REINHART als Fähigkeiten definiert, Fähigkeiten werden bei BACKHAUS UND REINHART als Features bezeichnet. [BACK15b, S. 1792]

Bild 3.1 zeigt die Teilschritte der Methode zur Erstellung des Klassifizierungsmodells. Zunächst sind Unterscheidungsmerkmale der Prozesse zu extrahieren. Anschließend müssen Parameter ermittelt werden, anhand derer sich die Prozesse beschreiben lassen. Aufbauend auf den Unterscheidungsmerkmalen und Beschreibungsparametern wird eine Basishierarchie aufgebaut. [BACK15b, S. 1792–1794]

Diese wird mit den Teilschritten 4-6 anwendungsgerecht erweitert. Dazu wird zunächst eine Sammlung der Betriebsmittel erstellt. Diese werden anhand von Unterscheidungsmerkmalen beschrieben und abschließend in die Basishierarchie eingeordnet. Dabei werden die in der Basishierarchie enthaltenen Parameter ergänzt. [BACK15b, S. 1794–1796]



Bild 3.1: Methode zur Clusterung nach BACKHAUS UND REINHART [BACK15b, S. 1792]

Method for Clustering Following BACKHAUS UND REINHART

HAMMERSTINGL UND REINHART stellen eine Begriffsübersicht vor, in der sie die Einteilung von Montageprozessen vornehmen [HAMM17]. Auszüge aus dieser Definition werden bei HAMMERSTINGL ET AL. [HAMM15, S. 51] und BACKHAUS ET AL. [BACK15b; BACK17] dargestellt. Die Einteilung der Begriffe ist jedoch nicht konsistent. So wird bei BACKHAUS ET AL. die Grundfunktion „Bewegen“ [BACK17, S. 521] aufgeführt, die HAMMERSTINGL UND REINHART als Teilfunktion des Handhabens auflisten [HAMM17, S. 11]. Aufgrund der Inkonsistenz in der Struktur und der grundsätzlichen Ähnlichkeit zu den Modellen von LOTTER UND WIENDAHL [LOTT12] sowie MÜLLER [MÜLL13a] wird an dieser Stelle auf eine detailliertere Darstellung des Modells verzichtet.

Hervorzuheben ist dieses Modell jedoch, da HAMMERSTINGL, BACKHAUS und REINHART das Ziel verfolgen, automatisch Vorschläge zur Anpassung der Betriebsmittel zu generieren bzw. automatische Programmierung der Roboter zu ermöglichen, was der Fragestellung dieser Arbeit sehr nahekommt. Zusätzlich zur Unterteilung der Prozesse, die sie als Fähigkeiten bezeichnen, nennen sie für einzelne Prozesse exemplarisch die Beschreibungsparameter, die erforderlich sind, um die Fähigkeiten abzubilden. Sie betonen, dass Fähigkeitsbeschreibungen „lösungsneutral“ [HAMM17, S. 6], also hersteller- und bauformunabhängig, sind. Tabelle 3.1 zeigt die Parameterbeschreibung für das Beispiel des Prozesstyps Sichern.

Tabelle 3.1: Fähigkeitsparameter für das Sichern [HAMM17, S. 26]

Parameters of the Capability Securing

Sichern		<i>Notwendigkeit</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Einheit</i>
<i>Input</i>	Aktiv	v	bool	true/false
	Sicherungsart	v	enum	[Norm]
	Sicherungskraft	o	real	N
	Posegenauigkeit	o	vector(6)	mm bzw. rad
	ROI	v	region	[Koordinaten]
	Max. Ausführzeit	o	real	ms
	...	o
<i>Output</i>	Status	v	enum	[Statemachine]
	Fortschritt	v	real	%

Alle numerischen Input-Parameter werden als Wertbereiche angegeben. v: verpflichtend, o: optional

3.1.2 Strukturierung von Betriebsmitteln

Structuring of Resources

Beschreibungen der Betriebsmittel existieren insbesondere aus Vertriebsicht von Herstellern der Montagebetriebsmittel. Zwei branchenübergreifende Strukturierungsmodelle werden im Folgenden vorgestellt. Darüber hinaus wird ein ausschnittsweiser Überblick über Strukturierungen von Betriebsmittelherstellern gegeben.

Modularer Betriebsmittelaufbau

Nach MÜLLER ET AL. unterteilen sich Montagestationen in Module (Bild 3.2) [MÜLL11, S. 428–430]. Die Gliederungsebene der Module ist konform zu der Ebene der Betriebsmittel von HESSE ET AL. [HESS12, S. 1] (vgl. Kapitel 2.1.1). KLUGE nennt als mögliche Module abhängig von ihrer Aufgabe Versorgungs- und Funktionsmodule [KLUG11, S.

19; NYHU13, S. 48; WIEN14, S. 138]. MÜLLER ET AL. unterteilen die Versorgungsmodule weiter in Transport- und Zuführmodule [MÜLL11]. Transportmodule dienen für den Transport der Bauteile zwischen den Stationen. Zuführmodule führen dem Kernprozess die zu verbauenden Komponenten zu. Darüber hinaus bezeichnen MÜLLER ET AL. Funktionsmodule als Prozessmodule und ergänzen sogenannte Basismodule [EILE14, S. 10]. Teil des Basismoduls ist beispielsweise das Grundgerüst einer Montagestation [MÜLL11, S. 429]. Prozessmodule erfüllen die tatsächliche Montageaufgabe. Mit dem Verständnis von HESSE ET AL. und MÜLLER ET AL. sind Montagebetriebsmittel folglich Prozessmodule. Es kann sich bei Prozessmodulen zum Beispiel um Schraubroboter, Automaten zum Nieten oder Prüfeinrichtungen handeln [MÜLL11, S. 430].

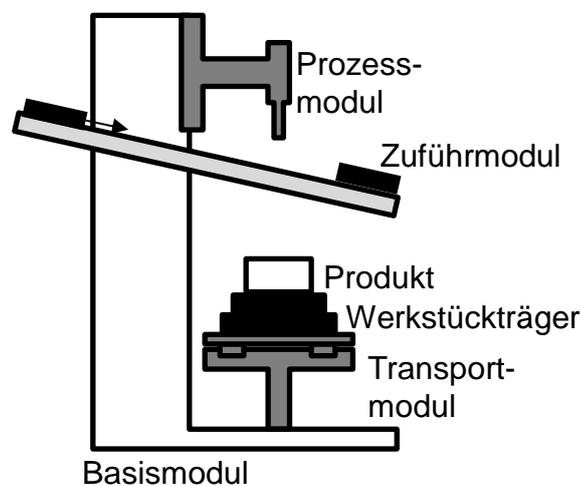


Bild 3.2: Betriebsmittelmodule [EILE14, S. 10]

Resource Modules

In aktuelleren Publikationen verdeutlicht MÜLLER sein Verständnis der Einteilung von Montagebetriebsmitteln, indem er in Analogie zur Produktstruktur die Montagesystemstruktur aufzeigt (Bild 3.3, vgl. Abschnitt Produkt in Kapitel 2.1.1) [MÜLL18a, S. 9–37]. Demnach werden die Module weiter in Baugruppen eingeteilt. Die Unterscheidung der Ebenen erfolgt nach der Zusammenbaustruktur. Diese deckt sich nicht immer mit der Bewegungsabhängigkeit einzelner Elemente zueinander, die für die geometrische Absicherung entscheidend ist.

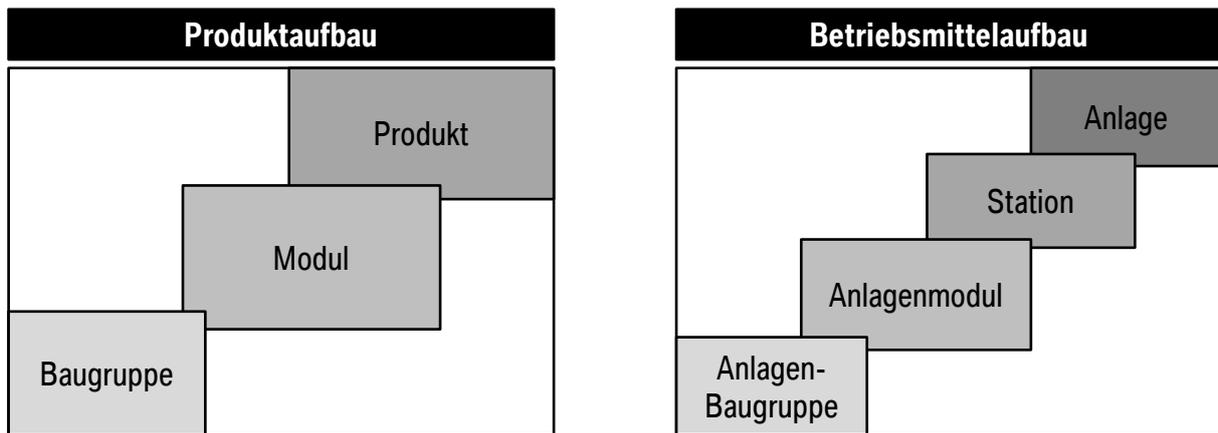


Bild 3.3: Aufbau von Produkt und Betriebsmittel in Anlehnung an MÜLLER [MÜLL18a, S. 17]

Structure of Product and Resource following MÜLLER

3.1.3 Datenmodelle zur Beschreibung von Metadaten für die Montageplanung

Data Models for the Description of Meta Data for the Assembly Planning

Wesentlich für den Erfolg der Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik ist deren Abstimmung aufeinander. Die Kompatibilität der Daten verschiedener Methoden und Werkzeuge sind von besonderer Relevanz. [BRAC18, S. 302–303]

Die zentralen Daten sind nach BRACHT ET AL. „die Produktstücklisten, die Prozesspläne sowie die Strukturen der Ressourcen“ [BRAC18, S. 303]. Damit nimmt er die gleiche Einteilung wie MÜLLER in Produkt, Prozess und Betriebsmittel vor (vgl. Kapitel 2.1.1) [MÜLL13a]. In diesem Kapitel wird eine Übersicht über Datenmodelle gegeben, die für die rechnergestützte Montage- und Absicherungsplanung entwickelt wurden.

Datenmodell zur Baubarkeitsprüfung nach MÜLLER ET AL.

MÜLLER ET AL. beschreiben ein umfassendes Datenmodell für prozessübergreifend verwendbare Daten in der Montageplanung [MÜLL15]. Aufbauend auf den Überlegungen von BRUNNER [BRUN16], JONAS [JONA00] und STEINWASSER [STEI96] zeigen sie die Zusammenhänge von Produkt, Prozess und Betriebsmittel in drei Partialmodellen auf.

Bild 3.4 stellt die referentielle Datenstruktur in einem Diagramm in Crows-Foot-Notation dar. Es existieren zunächst unterschiedliche Bauteilarten. Diese Bauteilarten besitzen unterschiedliche Bauteilvarianten. Die Kombination der Bauteilvarianten verschiedener Bauteilarten ergibt Produktvarianten. Diese wiederum werden anhand der Linienbelegung verschiedenen Montagelinien zugewiesen. Die Montagelinie besteht aus mehreren Montagestationen. Zugleich sind einer Montagestation über Prozesse die Bauteilarten zugewiesen, die an dieser Station verbaut werden (z. B. Gehäusedeckel verschrauben). So ergibt sich eine ringförmige Abhängigkeit der Objekte. Zusätzlich können einzelnen Stationen Fähigkeiten zugewiesen werden, die mit den Anforderungen der Bauteilvarianten verglichen werden müssen. Zur Festlegung der Abgleichsparameter werden Prozesstypen verwendet. Als beispielhafter Prozesstyp wird „drehmomentüberwachte Verschraubung“ angeführt. Im Vergleich zu den Modellen

von BRUNNER, JONAS oder STEINWASSER zeichnet sich das Modell durch die dynamische Integration der Linienbelegung und eine vereinfachte Pflege der Daten durch seine ringförmige Struktur aus.

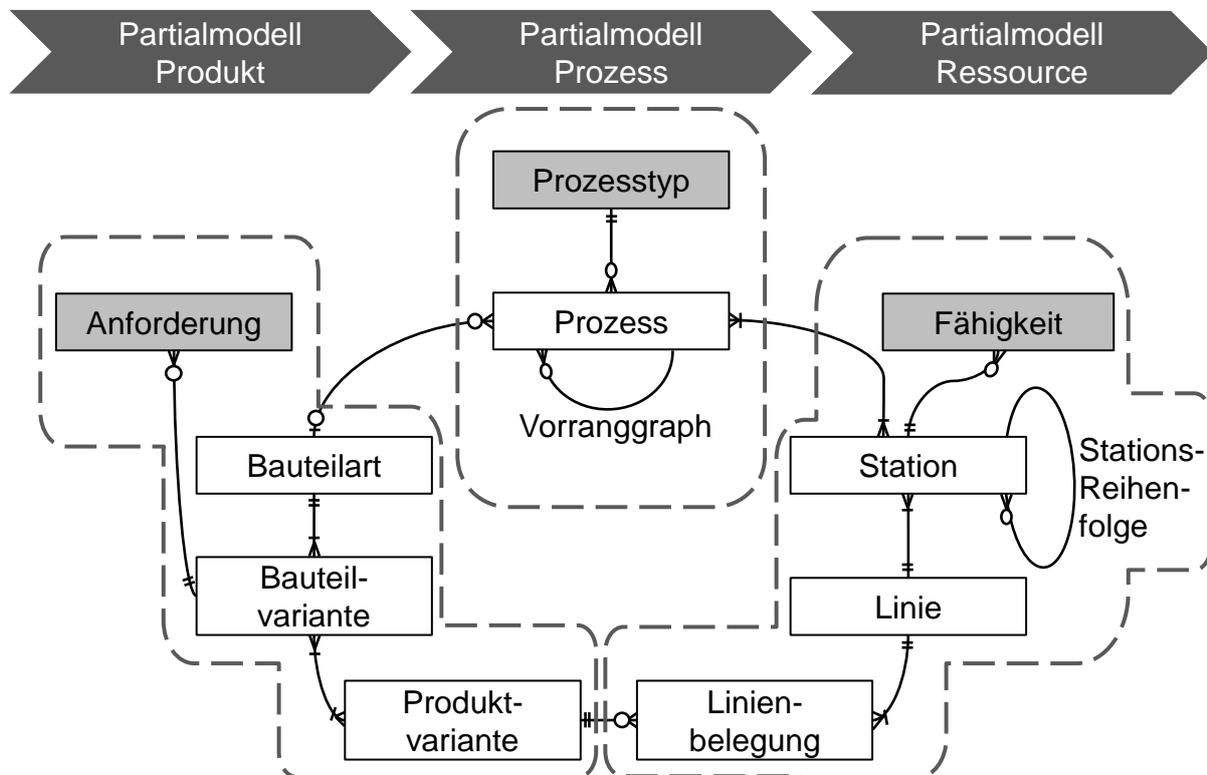


Bild 3.4: Datenmodell in Anlehnung an MÜLLER ET AL. [MÜLL15]

Data Model Following MÜLLER ET AL.

MÜLLER ET AL. zeigen 2017 Anwendungsfälle des Datenmodells in der betrieblichen Praxis auf. Bei der BMW Group wird das Modell verwendet, um die Belegung der Arbeitsplätze für Bauteilvarianten abzusichern. Dazu werden Auswertungsmethoden beschrieben, die einen schnellen Überblick über die Variantenanzahl und -entwicklung je Montageband erlauben (vgl. Abschnitt 3.4).

In dem Modell lassen sich mit vertretbarem Aufwand lediglich diskrete oder lineare Werte wie Drehmomente oder Koordinaten ablegen. Die Absicherung komplizierterer Geometrien, wie zum Beispiel Hüllkörper um ein Bauteil, werden als Entwicklungspotential identifiziert. Es wird deshalb insbesondere die „Weiterentwicklung der Beschreibungsform“ [MÜLL17, S. 259] empfohlen, sodass auch die Abbildung komplizierter Geometrien ermöglicht wird.

Datenmodell zur Absicherung nach LEISTNER ET AL.

Zur geometrischen Absicherung der Montage von Fahrwerkskomponenten in der Automobilmontage beschreiben LEISTNER ET AL. eine Methodik. Sie erkennen als Grundlage für eine hohe Automatisierung von simulationsgestützter Absicherung die Verfügbarkeit „standardisiert bereitgestellter Eingangsdaten“ [LEIS19, S. 75]. Die Bedeutung einer solchen zentralen Datenablage wächst zusätzlich vor dem Hintergrund, dass an

dem Planungs- und Entwicklungsprozess sowohl Montageplaner als auch Bauteilentwickler aus unterschiedlichen Bereichen beteiligt sind [LEIS19, S. 75]. Das zugrunde gelegte Datenmodell bei LEISTNER ET AL. dient ebenfalls zur Verknüpfung von Produkt und Betriebsmittel über Prozesse. Die Datenorganisation erfolgt jedoch objektorientiert. Als Ausgangsobjekt dient der einzelne Montageschritt in der Montagereihenfolge [LEIS19, S. 76]. Dieser ist mit dem Montageprozess in dieser Arbeit gleichzusetzen. Zu ihm werden die in Bild 3.5 dargestellten Informationen gespeichert.

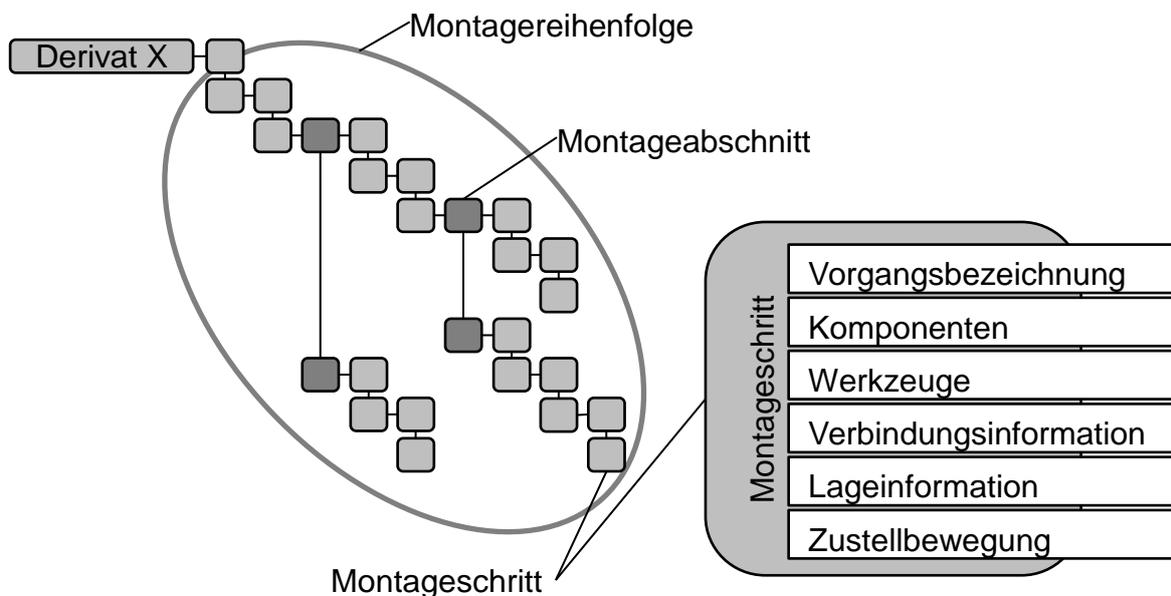


Bild 3.5: Montageorientierter Produktstrukturbaum [LEIS19, S. 76]

Assembly Oriented Product Structure Tree

Zur Verknüpfung des Prozesses mit dem Produkt sind dies die „Position des Montageschritts innerhalb der Montagereihenfolge, [der] Vorgang des Montageschritts (Fügen, Verschrauben, Stecken etc.) [und die] Komponente (Querlenker, Achsträger etc.)“ [LEIS19, S. 76]. Die Verknüpfung zu den Betriebsmitteln wird ermöglicht, indem die „Werkzeuge (Werkstückträger, Schrauber, Nuss etc.)“ [LEIS19, S. 76], die in dem Prozess verwendet werden, Daten über Verbindungsstellen, wie Schraubfalldaten und Drehmomente, sowie Lageinformationen der Komponenten, falls diese von der Konstruktionslage abweicht, am Prozess gespeichert werden. Darüber hinaus können Zustellbewegungen und CAD-Modelle für Komponenten und Werkzeuge hinterlegt werden.

Der Begriff Vorgang entspricht dem Montageprozessstyp. Die Information über die Zustellbewegungen erlaubt die Ablage konkreter Zustellpfade, jedoch nicht kompletter mechanischer Freiheitsgrade. Im Umfeld der Fahrwerksmontage wird primär von manuellen Montageprozessen ausgegangen, weshalb die mechanischen Freiheitsgrade in Form der Kinematik der Montagebetriebsmittel in dem Datenmodell nicht repräsentiert werden. Die Linienbelegung findet sich im Gegensatz zu dem Modell von MÜLLER ET AL. nicht wieder. Jede Kombination aus Produkt und Betriebsmittel muss einzeln zugeordnet werden.

Montagemodelle nach BACKHAUS und MICHNIEWICZ ET AL.

BACKHAUS beschreibt eine Datenstruktur für die Montageplanung basierend auf Modellen der Softwareentwicklung. Ähnlich wie MÜLLER ET AL. teilt er das Planungsumfeld zunächst in Partialmodelle ein (Bild 3.6) [MÜLL15]. In dem Umweltmodell wird der Aufbau des Montagesystems abgebildet [BACK15a, S. 97]. Beschreibende Domänen sind hier die Ressource und deren Skills, also Fähigkeiten. Im Aufgabenmodell bilden die Produkte und Prozesse die beschreibenden Domänen der zu erfüllenden Montageaufgabe.

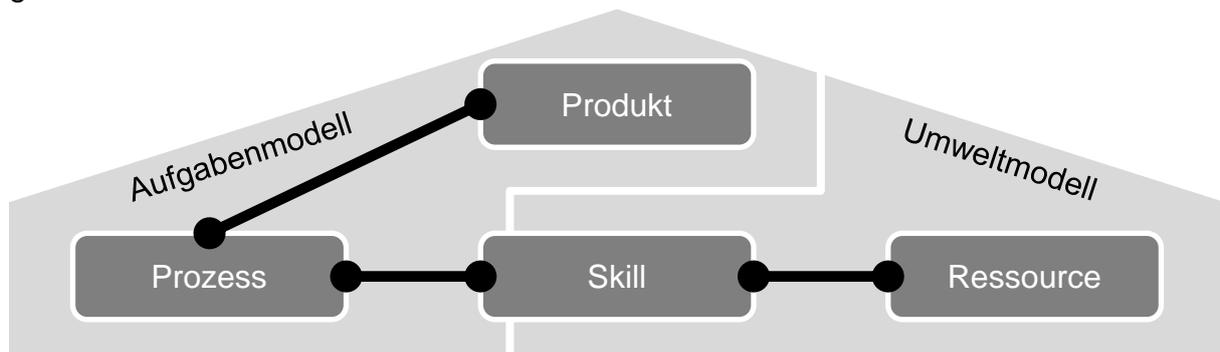


Bild 3.6: Modell für Montagesysteme nach BACKHAUS UND REINHART [BACK15b, S. 1790]

Model for Assembly Systems Following BACKHAUS UND REINHART

Produkte können durch ihre Geometrie in Form eines CAD-Modells, anwendungsrelevante Merkmale und die Lagekoordinaten im globalen Koordinatensystem beschrieben werden. Sind letztere nicht exakt bekannt, können auch Toleranzen oder Wertebereiche angegeben werden.

Prozesse werden weiter spezifiziert durch einen Prozess-Anteil, einen Geometrieanteil sowie Skills. Beim Verschrauben kann als ein Prozessparameter z. B. das geforderte Drehmoment angegeben werden. Geometrie-Informationen sind z. B. die Lage des Bauteils vor und nach Verbau sowie Fügepfade. Es müssen die für die Realisierung des Prozesses erforderlichen Skills beschrieben werden. Hier kann auch die Angabe der Reihenfolge ergänzt werden. BACKHAUS betont, dass die Geometrieinformationen in Relation zum Produkt anzugeben sind [BACK15a, S. 99].

Zur Beschreibung der Skills wird das in Kapitel 3.1.1 dargestellte Verfahren zur Klassifizierung der Prozesse verwendet. Sie werden mit beschreibenden Merkmalen abgebildet. Instanzen der Skills werden einzelnen Ressourcen zugewiesen. [BACK15a, S. 92–100]

Für diese wiederum werden bei BACKHAUS anwendungsspezifische Parameter für die aufgabenorientierte Programmierung von Robotern beschrieben. Darüber hinaus wird jedoch eine beschreibende Klasse als Grundstruktur bezeichnet. Sie beinhaltet allgemeine Informationen und Dokumentationsinformationen, Geometriedaten, kinematische Schnittstellen sowie die Lageinformationen der Betriebsmittel und einzelner Baugruppen. [BACK15a, S. 118]

MICHNIEWICZ ET AL. ergänzen das Modell für die „Automatisierte digitale Anlagenplanung“ [MICH17, S. 582] um eine „Planungs- und Optimierungs-Domäne“, die die Schnittstelle zum Montageplaner bildet. Darin können die Parameter des Gesamtmodells für konkrete Planungsfälle (Szenarien) adaptiert werden. [MICH17, S. 584, 586-587]

Grundsätzlich wird bei MICHNIEWICZ ET AL. von einer detaillierten Beschreibung des Produktes anhand eines Anforderungsmodells und der Betriebsmittel anhand von Schnittstellenbeschreibungen zum Produkt ausgegangen [MICH17, S. 587]. Diese werden jedoch nicht näher beschrieben. Eine Linienbelegung wird nicht berücksichtigt.

3.1.4 Erzeugung des Bauzustands

Generation of the State of Assembly

Grundlegende Voraussetzung für die geometrische Absicherung eines Montageprozesses ist das Vorliegen des Produktmodells im jeweiligen Bauzustand. BRACHT ET AL. weisen explizit darauf hin, dass die Sortierung der Bauteile im CAD-Strukturbaum eines Produktmodells in Montagereihenfolge wesentlich zur montagegerechten Produktbeeinflussung beiträgt [BRAC18, S. 14, 306]. Somit kann die automatische Bauzustandserzeugung sowohl bei der proaktiven Produktgestaltung als auch iterativen Produktoptimierung Mehrwert erzeugen.

Bauzustandserzeugung mit Product Lifecycle Management-Systemen

Das Product-Lifecycle-Management (PLM) stellt ein Konzept zur durchgängigen Verwaltung und Verarbeitung sämtlicher produkt- und prozessbezogener Informationen dar, die im Rahmen des Produktlebenszyklus entstehen [ARNO05, S. 7; BOOS06, S. 781]. Als Teilsystem des PLM kann das Produktdatenmanagement (PDM) verstanden werden. Gemäß der VDI 2219 deckt der Begriff des PDM die Datenverwaltung für das PLM ab [VDI16]. Ein Beispiel für ein PLM-Werkzeug ist die Software Teamcenter der Firma Siemens.

Zur Herstellung des Bauzustandes bietet Teamcenter das Softwaremodul In-Process-Assembly (IPA) [SIEM17, S. 242–248]. Voraussetzung für die Erstellung des Bauzustandes ist die vorherige eindeutige, manuelle Zuordnung sämtlicher Bauteile in dem CAD-Modell des Produktes zu der jeweiligen Montagestation [SIEM17, S. 71–84]. Teamcenter bietet neben der Darstellung des Bauzustandes in dem internen Viewer auch ein Senden der erzeugten Modelle an Siemens NX, sodass eine Verwendung der Bauzustandsmodelle in einem Konstruktionsprogramm ermöglicht wird [SIEM17, S. 44].

Bauzustandserzeugung nach LEISTNER ET AL.

LEISTNER ET AL. identifizieren als Problemstellung bei der virtuellen Absicherung ebenfalls, dass der Bauzustand des Produktes in dem jeweiligen Prozess häufig datentechnisch nicht dokumentiert ist. Sie entwickeln daher ein PDM-Datenmodell zur Sortierung

der Bauteile im CAD-Strukturbaum in CATIA V5, das die vollständige Montagevorrangfolge als „Kette von Montageschritten“ [LEIS19, S. 76] abbildet. Insbesondere Vormontagen werden gesondert in der Baumstruktur eingeordnet.

Der Strukturbaum ist nach LEISTNER ET AL. wie in Bild 3.5 (S. 44) aufgebaut. Der oberste Knoten stellt den letzten Montageschritt dar. Der vorletzte Montageschritt ist in dem Strukturbaum direkt unter dem letzten Schritt eingehängt und so weiter. So kann nach unten die Montagereihenfolge rückwärts abgelesen werden. An den jeweiligen Montageschritt können die zu verbauenden Komponenten direkt angehängt werden. Dies muss initial für jede Bauteilvariante erfolgen. LEISTNER ET AL. arbeiten mit Referenzen auf die Bauteilmodelle, sodass Änderungen bei der Konstruktion auch direkt in dem Montagevorrangmodell angezeigt werden. Für verschiedene Bauteilvarianten und jeden Werkstandort müssen eigene Baumstrukturen aufgebaut werden [LEIS17, S. 362]. Einmal aufgebaute Strukturen können jedoch einfach geändert oder ausdetailliert werden, indem zum Beispiel Montageschritte zwischen zwei bereits eingestellten Schritten eingefügt werden.

Durch die spezielle Strukturierung ist eine gesonderte Ein- und Ausblendelogik erforderlich, um schnell den gewünschten Bauzustand anzuzeigen. In CAD-Konstruktionswerkzeugen oder CAD-Viewern ist es üblicherweise möglich komplette Knoten im Strukturbaum mit allen darunter hängenden Bauteilen auszublenden. In der Baumstruktur von LEISTNER ET AL. müssten zum manuellen Einblenden eines Bauzustandes in einer spezifischen Station nur die Bauteile in allen übergeordneten Knoten ausgeblendet werden. In den untergeordneten Knoten müssten jedoch alle Bauteile eingeblendet werden. Dies wird von LEISTNER ET AL. in CATIA V5 durch Erweiterung mit einem Plugin ermöglicht. Nachteil der spezifischen Darstellung ist somit, dass die Bauzustandsmodelle nicht mit den Standardfunktionen in anderen CAD-Systemen oder Viewern anwendbar sind, ohne dass eine Erweiterung durch ein Plugin angeboten wird.

3.2 B) Rekonfigurationsräume

Reconfiguration Area

In der Vorentwicklung liegen noch keine Geometriedaten zu den Bauteilen vor. Da zu diesem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess die Beeinflussbarkeit des Produktes noch sehr hoch ist, ist hier eine proaktive Produktgestaltung besonders wirksam. In diesem Kapitel werden Methoden zur integrierten Produkt- und Prozessgestaltung in der frühen Entwicklungsphase vorgestellt. In Kapitel 3.2.1 werden Methoden zur Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen und in Kapitel 3.2.2 Methoden zur Definition von Rekonfigurationsräumen betrachtet.

3.2.1 Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen

Determination of Reconfiguration Demands

KARL beschreibt eine unzureichende Betrachtung der Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen in der Literatur. Deshalb entwickelt er ein Konzept zur Bestimmung der Rekonfigurationsbedarfe je Betriebsmittel. Dieses ist nach KARL explizit für die Erhöhung der Rekonfigurationsfähigkeit anwendbar. Um hierfür die rekonfigurationshemmenden Bauteile des Betriebsmittels zu ermitteln, müssen sämtliche Bauteile einzeln bewertet werden. [KARL14, S. 98–99]

BACKHAUS ET AL. beschreiben, dass „plausible Wandlungsszenarien“ [BACK12, S. 339] entwickelt werden müssen, denen Eintrittswahrscheinlichkeiten zuzuordnen sind. Das Ergebnis ihrer Vorgehensweise ist die an ein Wandlungsszenario angepasste Modularisierung eines Montagesystems. Modultreiber können produkt- und prozessbedingt sein. Die für eine Produkt- oder Prozessänderung erforderlichen Montagefunktionen werden in der Bewertungsphase hinsichtlich ihrer Erfüllung der Modultreiber bewertet. Der Erfüllungsgrad wird gewichtet und zu der „Wandlungseinflusskennzahl“ [BACK12, S. 341] addiert, wodurch die Schneidung der Module beeinflusst wird.

SIEDELHOFER ET AL. beschreiben analog zu den Modultreibern Veränderungstreiber, die Anlass für die Durchführung einer Rekonfigurationsplanung sind. Sie teilen diese in die drei Kategorien „Produktänderung, die Veränderung des Produktionsprogramms (Model-Mix) und die Stückzahländerung“ [SIED17, S. 142] ein. [SIED17, S. 141–145]

Zur Entscheidung, welche Betriebsmittelkomponenten standardisiert werden können, beschreibt BRUNNER eine Risikomatrix (Bild 3.7) aus Änderungswahrscheinlichkeit und Auswirkung einer Änderung eines Produktmerkmals auf das Produktionssystem [BRUN16, S. 65].

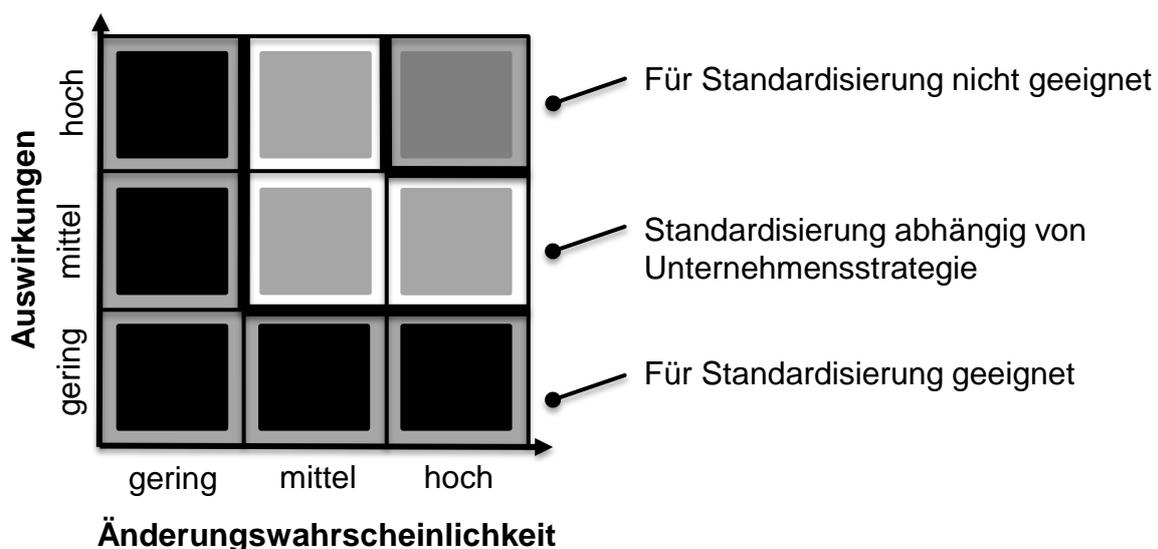


Bild 3.7: Risikomatrix nach BRUNNER [BRUN16, S. 65]

Risk Matrix by BRUNNER

Ist die Änderungswahrscheinlichkeit, oder die Auswirkung im Produktionssystem bei Änderung eines Produktmerkmals gering, kann eine Standardisierung erfolgen. Für dieses Produktmerkmal müssen keine Rekonfigurationsräume ermittelt werden. Bei gleichzeitig hoher Änderungswahrscheinlichkeit und hoher Auswirkung ist hingegen eine Standardisierung nicht sinnvoll und somit eine erhöhte Rekonfigurationsfähigkeit erforderlich. In den anderen Fällen ist neben der Produktänderung auch die Unternehmensstrategie zu berücksichtigen. [BRUN16, S. 63–66]

3.2.2 Definition von Rekonfigurationsräumen für die Produktgestaltung

Definition of Reconfiguration Areas for Product Design

Übliche Methoden zur Erhöhung der Rekonfigurationsfähigkeit eines Montagesystems nutzen primär die Modularisierung [BACK17; EILE14; HALF14]. Diese stellt eine besondere Form der Produktstrukturierung dar, welche in die Verantwortung der Vorentwicklung fällt [HALF14, S. 18] (siehe auch Kapitel 2.1.4).

Bei den Modularisierungsmethoden kann nach HALFMANN ET AL. basierend auf SCHUH [SCHU05] grundsätzlich in die Kategorien technisch-funktionaler und produktstrategischer Modularisierung unterschieden werden [HALF14, S. 19]. Darüber hinaus existieren integrierte Modularisierungsmethoden, bei denen eine Verknüpfung der beiden Kategorien genutzt wird. Eine solche Methode ist der Integrierte Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien (PKT-Ansatz) [KIPP10, S. 4; BLEE10, S. 3–10]. Er besteht aus den vier Phasen „Ermittlung der Ziele, Reduzieren der internen Vielfalt, Modularisieren der Produktfamilie und Ableiten des finalen Konzepts“ [HALF14, S. 53]. Bei der Definition der Ziele sind insbesondere auch produkt- und produktionsstrategische Zielsetzungen zu berücksichtigen. Ausgangspunkt der Betrachtungen bei dem PKT-Ansatz ist immer eine existierende Produktgruppe. [BLEE10, S. 3–10; KIPP10, S. 4–12]

HALFMANN ET AL. entwickeln diesen Ansatz zur montagegerechten Produktstrukturierung weiter und richten ihn speziell auf die Vorentwicklungsphase aus (Bild 3.8). Dabei betonen sie, dass in der frühen Produktentwicklungsphase lediglich eine Betrachtung von Produktkonzepten möglich ist und konstruktive Elemente nicht beeinflussbar sind [HALF14, S. 149]. Ein wesentlicher Aspekt bei HALFMANN ET AL. sind „produktstrategische[...] Ziele aus Montagesicht“ [HALF14, S. 82]. Daraus lassen sich Maßnahmen zur montagegerechten Produktstrukturierung entwickeln. Die Produktstrukturen werden wiederum anhand definierter Kriterien hinsichtlich ihrer Zielerfüllung bewertet. Diese Bewertung ermöglicht die Validierung und Auswahl der für die Zielsetzung am besten geeigneten Produktstruktur. [HALF14, S. 82–83]

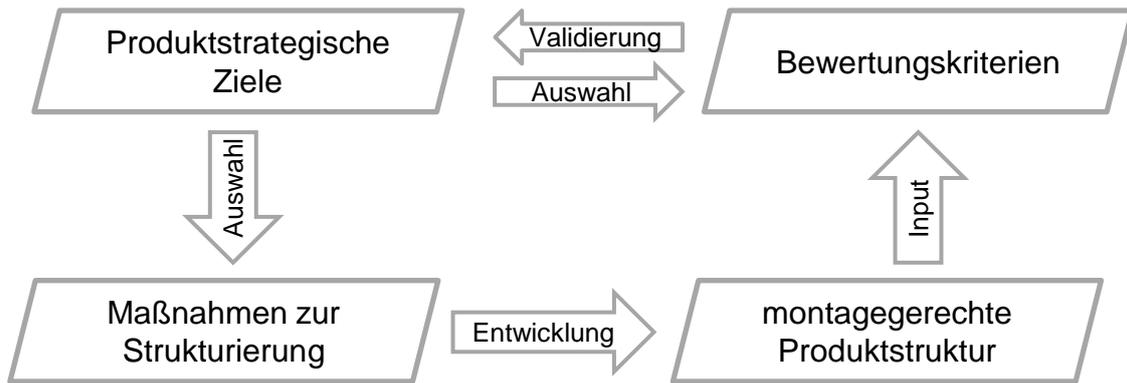


Bild 3.8: Methodischer Rahmen zur Entwicklung montagegerechter Produktstrukturen [HALF14, S. 82]

Methodological Framework for the Development of Assembly Oriented Product Structures

HALFMANN ET AL. stellen eine Übersicht produktstrategischer Ziele zur Verfügung. Primäre Zielsetzung ist bei HALFMANN ET AL. nicht die technische Machbarkeit, sondern die Bestimmung von Systemkenngrößen wie die Durchlaufzeit, Mitarbeiterflexibilität oder Mengenflexibilität. [HALF14, S. 87]

Zudem wird ein Katalog möglicher Maßnahmen zur Strukturierung vorgestellt, die aus montagegerechten Aspekten abgeleitet werden [HALF14, S. 154]. Durch die Fokussierung auf spezifische Ziele wird vermieden, dass unrealistische Szenarien betrachtet werden. Es müssen jedoch einige Konzepte detailliert ausgeplant werden, die anschließend zu einer Optimallösung kombiniert werden. Dies erzeugt einen hohen Aufwand bei der Erstellung der Strukturierungskonzepte. Schnittstellen, auch solche zu vorhandenen Betriebsmitteln, werden bewusst nicht berücksichtigt [HALF14, S. 149]. Die Methode ist somit nicht für die Integrationsplanung ausgelegt. Die Betrachtung mehrerer Produkte innerhalb von Produktfamilien ist jedoch wesentlicher Bestandteil dieser Methode [HALF14, S. 153]. Auch nach Aufstellung ihrer Methode stellen HALFMANN ET AL. als Forschungsbedarf fest, dass der Wissenstransfer von der Montage in die Vorentwicklung zur Berücksichtigung „produktionsstrategischer“ [HALF14, S. 155] Zielsetzungen weiter ausgebaut werden muss.

SIEDELHOFER ET AL. beschreiben in ihrem Konzept zur Rekonfiguration flexibler Montagesysteme ein ähnliches Vorgehen [SIED17, S. 141–145]. Es gibt Veränderungstreiber, die produkt-, prozess-, oder montagesystemseitig auftreten können. Dadurch wird eine Änderung am vorhandenen Montagesystem erforderlich. Der jeweilige Planungsbaustein kann nun mittels verschiedener Stellhebel, der „beeinflussbaren Einflussgrößen“ [SIED17, S. 143] im Planungsprozessmodell, entwickelt werden. Es wird offen gelassen, welchen Detailgrad ein Stellhebel haben muss. Als Beispiel wird jedoch die Entscheidungsmöglichkeit dargestellt, ob eine Produktänderung durch eine neue Montagestation oder durch die Änderung einer bestehenden Montagestation integriert wird [SIED17, S. 143]. In einem Beispiel werden zudem neben der Layoutgestaltung und

Vorranggraphenerstellung auch die Austaktung und Anlagenkonstruktion als zu betrachtende Planungsbausteine dargestellt [SIED17, S. 143]. Somit wird hier grundlegend auch die technische Lösung auf Betriebsmittelseite mit in Betracht gezogen.

Ein detaillierteres Werkzeug zur Beschreibung technischer Rekonfigurationsräume wird von EILERS vorgestellt. Er geht von einem modularen Betriebsmittelaufbau aus und beschreibt als mögliche Rekonfigurationsmechanismen den Austausch, das Hinzufügen, Entfernen oder Anpassen einzelner Stationsmodule [EILE14, S. 75]. Er führt eine Sammlung rekonfigurationsgerechter Gestaltungsrichtlinien für Montagebetriebsmittel auf [EILE14, S. 76]. Dies überträgt er auch auf die Hierarchieebenen unterhalb des Stationsmoduls [EILE14, S. 77]. EILERS beschreibt eine Produkt-Montage-Morphologie (PMM), anhand derer sich die Zusammenhänge von montagerelevanten Produktmerkmalen zu dem Montageprozess und der Montageressource herstellen lassen [EILE14, S. 83–85]. Anhand der PMM lassen sich die Auswirkungen potenzieller Produktveränderungen auf montagerelevante Produktmerkmale und somit auf das betroffene Element am Montagebetriebsmittel ermitteln [EILE14, S. 84], was dem Begriffsverständnis der Rekonfigurationsräume dieser Arbeit (Kapitel 2.1.1) entspricht.

3.3 C) Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten

Visualization of Resource Capabilities

Im Verlauf des Produktentwicklungsprozesses nimmt der Detailgrad der Produktgestalt zu. Sobald mit der Konstruktion einzelner Bauteile gestartet wird, können die Fähigkeiten der Montagebetriebsmittel bereits berücksichtigt werden, um so neben anderen Faktoren auch die Baubarkeit des Produktes einfließen zu lassen. Hierzu sollen im Folgenden visuelle Methoden vorgestellt werden, anhand derer den Bauteilkonstrukteuren produktrelevante Montagemerkmale direkt in der CAD-Konstruktionssoftware angezeigt werden. Es wird zunächst untersucht, welche Modelle eine intuitive Visualisierung fördern (Kapitel 3.3.1). Daraufhin werden Modelle zur Identifikation produktrelevanter Darstellungsinhalte erläutert (Kapitel 3.3.2). Anschließend wird untersucht, wie die Visualisierungsmodelle produktkompatibel gestaltet werden können (Kapitel 3.3.3). In Kapitel 3.3.4 wird analysiert, wie ein Regelwerk zur strukturierten Erstellung von Visualisierungsmodellen aufzubauen ist.

3.3.1 Modelle zur intuitiv verständlichen Visualisierung

Models for Intuitively Comprehensible Visualization

Durch den Einsatz visueller Attribute kann die intuitive Verarbeitung von Daten gezielt angeregt werden [SCHU00, S. 2–3]. Somit stellt ein systematischer und strukturierter Aufbau eines Visualisierungsmodells die Basis für ein intuitives Verständnis eines Sachverhalts dar. STAPELKAMP beschreiben die Wirkung grafischer Darstellungen [STAP13, S. 130–149]. Das sind zum Beispiel das Prinzip der Ähnlichkeit, nach dem sich ähnelnde Elemente als zusammengehörig wahrgenommen werden und das Prinzip der Geschlossenheit, nach dem Rahmen aus Linien als Fläche wahrgenommen

werden. Diese Wirkungen können folglich als Grundregeln einer intuitiv verständlichen Darstellung von Sachverhalten verwendet werden. [STAP13, S. 130–149]

Bei seiner Methode zur montagegerechten Produktgestaltung stellt KARL heraus, dass bildliche Darstellungen der quantitativen und textuellen Beschreibungen von Betriebsmittelfähigkeiten und Anforderungen eine sinnvolle Ergänzung sein können [KARL14, S. 60]. Insbesondere zur Darstellung komplizierter Sachzusammenhänge wie Geometrien seien technische Zeichnungen ein Instrument zur Reduzierung des Beschreibungsaufwandes. Alternativ lassen sich Produkthanforderungen und quantitative Wertebereiche der Fähigkeiten durch Grafiken wie einen Zahlenstrahl darstellen (vgl. Bild 3.9).

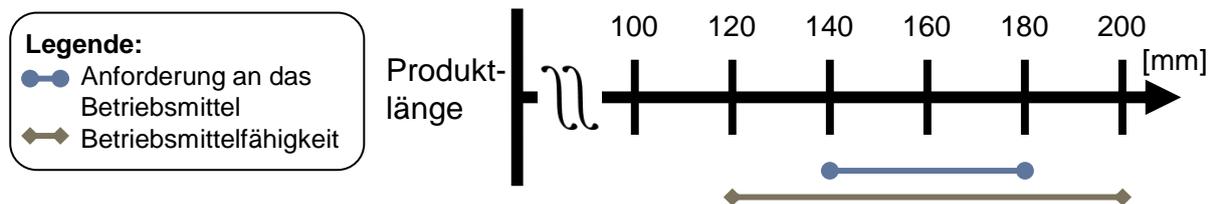


Bild 3.9: Fähigkeitsdarstellung nach KARL [KARL14, S. 54]

Visualization of Capabilities by KARL

Ein ähnlicher Ansatz findet sich im Anforderungsmanagement. Anforderungen werden in diesem Wissenschaftsfeld nicht wie in der Montageplanung als Restriktionen für die Betriebsmittelgestaltung verstanden. Im Anforderungsmanagement stehen Anforderungen an ein Produkt im Vordergrund. Hier wird lediglich gefordert, dass neben textuellen Anforderungsformulierungen auch bildliche Darstellungen als Ergänzungen verwendet werden, um den geforderten Zielzustand zu verdeutlichen [LOTT12, S. 18]. Im Rahmen von Prozessmerkmalsbaukästen werden Anforderungen an die Bauteile und Produkte beschrieben. In der betrieblichen Praxis bei der BMW Group zeigt sich ebenfalls, dass eine rein textuelle Beschreibung zwar für die Lastenheftdefinition erforderlich ist, aber in vielen Fällen nicht ausreicht, um das Produktmerkmal eindeutig zu beschreiben. So kann beispielsweise eine Anforderung lauten: *Der Durchmesser des großen Pleuelauges muss 40 mm betragen*. Hiermit ist jedoch zum Beispiel nicht beschrieben, ob dies inklusive der Hauptlagerschalen betrachtet wird oder exklusive der Hauptlagerschalen. In einer technischen Zeichnung oder einfachen grafischen Darstellung kann eindeutiger und prägnanter definiert werden als in rein textueller Form.

Durch Prozessvideos lassen sich dynamische Abläufe und Montagepfade kommunizieren. Sie dienen unter anderem als Werkzeug zur Analyse komplexerer Zusammenhänge, die nach KNESCHKE UND SCHMAUDER jedoch durch Erfahrungswissen interpretiert werden müssen. [KNES12, S. 798–799]

In der Produktentwicklung existieren Methoden für den Transport von Vorgaben für den Produktionsprozess oder Zusatzinformationen am Produkt. Diese Informationen

werden als Product Manufacturing Information (PMI) bezeichnet. Informationsträger sind klassischerweise technische 2D-Zeichnungen. In der ISO 16762 werden Praktiken zur digitalen Produktdatendefinition beschrieben [ISO15]. Mit dem 3D-Master-Prozess beschreiben KITSIOS UND HASLAUER aufbauend auf der ISO 16762 wie die Verlagerung der Kerndatenquelle für bauteilbeschreibende Informationen von der 2D-Zeichnung in die 3D-Umgebung erfolgen kann. So stellt das 3D-Modell den Single-Point-of-Truth, also die zentral gültige und verlässliche Datenquelle für alle PMI, dar und ermöglicht eine einfache Pflege und erhöhte Durchgängigkeit der Daten im Produktentwicklungsprozess [KITS14, S. 1–5]. Der Prozess wird am Beispiel CATIA V5 erläutert und in die Teilschritte Datenerzeugung, Datenaufbereitung und Datenumwandlung eingeteilt. [KITS14, S. 2–219]

Im Rahmen der Datenerzeugung wird zunächst das Bauteil in der Konstruktionsumgebung definiert. Das erzeugte Produkt- oder Bauteilmodell wird um sogenannte Annotation Sets (Anmerkungssets) ergänzt. In CATIA V5 erfolgt das in dem Modul Functional Tolerancing and Annotations (FTA). Nun werden Anmerkungebenen (Views) erzeugt. Sie stellen die Standardansichten einer technischen Zeichnung dar (auch Kameraansicht) und können in 2D-Zeichnungen verwendet werden. [KITS14, S. 23–55]

Anmerkungen oder FTA-Features können als textuelle Anmerkungen eingefügt werden, die an bestimmte Bauteilgeometrien oder geometrische Elemente assoziativ geknüpft werden oder ohne Verknüpfung zu einem Element in der Anmerkungebene platziert werden können. Der Text der Anmerkung kann unveränderbar eingetippt werden, oder einen Parameter enthalten, der abhängig von einer Eigenschaft des Geometrieelements ist (z. B. Material). KITSIOS UND HASLAUER empfehlen einen standardisierten Aufbau der Textanmerkungen und die Verwendung von eindeutigen Trennzeichen, sodass bei Bedarf auch eine automatische Auswertung der Anmerkungen möglich ist. Mittels sogenannter Flaggenanmerkungen können zudem Hyperlinks an Geometrieelemente angeheftet werden. Analog zu einer technischen Zeichnung können auch Bemaßungen in CAD-Systemen als PMI normgerecht an das 3D-Modell angehängt werden. [KITS14, S. 55–100]

In der 3D-Master-Methodik wird empfohlen, zur Sicherstellung der Übersichtlichkeit und eines schnellen Zugriffs auf notwendige Informationen mit sogenannten Captures (Modelldarstellungen) zu arbeiten. Mittels Captures lässt sich die Sichtbarkeit von Annotations, Bodies, Instances und Geometrical Sets steuern. Eine voreingestellte Sicht auf das Bauteilmodell wird im Capture gespeichert und ist durch nur einen Klick aufrufbar. Die Benennung eines Captures ist besonders relevant, da mit ihr dem Anwender schnell die Inhalte des Captures vermittelt werden. [KITS14, S. 100–109]

Bei der Bauteilentwicklung mittels 3D-Master-Prozess werden die Daten abschließend zum Beispiel aus Gründen des Wissensschutzes oder der besseren Austauschbarkeit von Modellen in ein Ersatzformat konvertiert. KITSIOS UND HASLAUER beschreiben Methoden, mit denen sichergestellt werden kann, dass die PMI und assoziative Verknüpfungen bei diesem Datenaufbereitungsprozess erhalten bleiben. [KITS14, S. 187–219]

3.3.2 Identifikation produktrelevanter Darstellungsinhalte

Identification of Product Relevant Visualization Contents

Nachdem unterschiedliche Methoden zur Visualisierung vorgestellt wurden, wird in diesem Abschnitt untersucht, welche Inhalte dargestellt werden müssen, um eine wirksame proaktive Produktgestaltung zu erzielen. Dabei ist das Prinzip der Modellverkürzung zu befolgen (vgl. Kapitel 2.2). In der Begrifflichkeit von BRUNNER ET AL. (vgl. Kapitel 2.1.1) sind folglich nur produktrelevante Betriebsmittelmerkmale darzustellen [BRUN12, S. 827].

Neben den Prozessspezifika auf Betriebsmittelebene werden bei der Integrationsplanung auch generelle Informationen über standardisierte Elemente wie die Linienbelegung [MÜLL15, S. 554] oder den Bauzustand eines Produktes in der jeweiligen Montagestation benötigt [BRAC18, S. 303–310]. Solche Standardisierungselemente teilt BRUNNER in 3 Ebenen ein:

In der ersten Ebene „Prämissen, Strategie“ [BRUN16, S. 52] werden grundlegende Prämissen wie die Ausbringungsmenge einer Montagelinie oder die Taktzeit und die Einbettung in die Unternehmensstrategie beschrieben. Daraus ergeben sich Vorgaben für die tieferen Ebenen, woraus in Ebene zwei primär ein spezifischer Montagevorranggraph und folglich der Bauzustand des Produktes sowie in Ebene 3 Betriebsmittelstandards definiert werden, die Restriktionen für montagerelevante Produktmerkmale bewirken. [BRUN16, S. 52–53]

BRUNNER beschreibt, dass die Ermittlung der produktrelevanten Betriebsmittelmerkmale anhand einer Schnittstellenbetrachtung zwischen Produkt und Betriebsmittel erfolgen muss [BRUN16, S. 76, S. 98]. Die Ausprägungen dieser Merkmale sind über Experteninterviews oder aus Konstruktionszeichnungen und Produktmodellen zu ermitteln [BRUN16, S. 61–63].

MÜLLER ET AL. machen sich die Definition der relevanten Merkmale je Prozesstyp durch Experten zunutze [MÜLL15, S. 553–557]. Neue Varianten, die die gleichen Prozesstypen erfordern, können mit den gleichen Merkmalen beschrieben werden, sodass dokumentiertes Expertenwissen wiederverwendet wird [MÜLL15, S. 555]. Sie verwenden explizit den Begriff der Fähigkeiten der Montage, womit sie darauf aufmerksam machen, dass ein Parameter zur Beschreibung der produktrelevanten Betriebsmittelmerkmale nicht nur eine zulässige Ausprägung, sondern auch einen zulässigen Ausprägungsbereich, also Flexibilität haben kann [MÜLL15, S. 556].

BACKHAUS UND REINHART beschreiben, dass eine vollständige Definition der relevanten Merkmale nicht unternehmensübergreifend erstellt werden kann, sondern immer durch unternehmensspezifische Untersuchungen ergänzt werden muss [BACK15b, S. 1792]. Eine unternehmensübergreifende Sammlung solcher Merkmale auf Betriebsmittelebene ohne Anspruch auf Vollständigkeit stellen HAMMERSTINGL UND REINHART auf (vgl. Kapitel 3.1.1) [HAMM17, S. 9–35].

3.3.3 Produktkompatible Visualisierungsmodelle der Betriebsmittelfähigkeiten

Product-Compatible Visualization Models of the Resource Capabilities

Montagerelevante Informationen werden üblicherweise in anderen Systemen definiert als die Bauteilkonstruktion. Häufigste Darstellungsform für Montagereihenfolgen ist ein Graph [BRAN14, S. 13]. Linienbelegungen werden beispielsweise in Datentabellen definiert [MÜLL15, S. 555–556]. Montagerelevante Restriktionen für die Produktgestaltung werden in Form von Anforderungssätzen an die Produktentwicklung übergeben [POHL08, S. 239–243]. Die Dokumentation der produktrelevanten Betriebsmittelmerkmale variiert in der Darstellungsform folglich stark. In der betrieblichen Praxis zeigt sich zudem, dass die Auffindbarkeit der Informationen eine große Herausforderung darstellen kann (vgl. Kapitel 2.3.1).

Entscheidend bei der Bereitstellung produktrelevanter Betriebsmittelmerkmale ist nach STEGEMANN die Darstellung in der „Sprache des Entwicklers“ [STEG10, S. 30], also seiner Arbeitsumgebung, um Medienbrüche möglichst zu vermeiden. In der Literatur wird lediglich der Mehrwert einer Darstellung der Fähigkeiten im CAD-Konstruktionssystem erörtert. Umsetzungen hierzu finden sich in der Literatur nicht.

3.3.4 Regelwerk zur strukturierten Erstellung der Visualisierungsmodelle

Regulations for a Structured Creation of the Visualization Models

Nach KORNWACHS sind technische Regeln „Handlungsanweisungen für technische Handlungen“ [KORN10, S. 150]. Sie dienen einer konkreten Zwecksetzung [KORN10, S. 150] und werden in technischen Regelwerken gesammelt.

Das Rahmenwerk für technische Regeln bildet eine technische Dokumentation, deren Ziel die Organisation und Archivierung von Handlungen zur Steuerung von Prozessen ist. Neben der Tätigkeitsbeschreibung in Form technischer Regeln sind eine Leistungs- und Gerätebeschreibung sowie eine Beschreibung der Funktionsweise und erweiternde Dokumente optionale Bestandteile technischer Dokumentationen. [JUHL15, S. 16–20]

Der Aufbau eines Rahmenwerkes zur Sammlung von Gestaltungsregeln zur montagegerechten Produktgestaltung wird von LOTTER UND WIENDAHL beschrieben [LOTT12, S. 11].

Technische Regeln zielen auf die „Koordinier-, Kombiner- und Austauschbarkeit von Komponenten und Standards“ [BAUE18, S. 157] ab. Darüber hinaus dienen sie unter anderem „der Rationalisierung von Produktionsvorgängen“ [BAUE18, S. 157]. Sie sind als Wissenssammlung und Standard ohne rechtliche Verbindlichkeit zu verstehen. Eine technische Regel muss nach HERTEL ET AL. bestimmte formale und inhaltliche Merkmale erfüllen. Sie muss eine Angabe über den Herausgeber und Autor enthalten sowie in nur einem Dokument mit eindeutiger Dokumentennummer festgehalten sein. Zudem muss die Gültigkeitsdauer angegeben sein und sie muss vor Veröffentlichung eine Zeit zur Revision der Inhalte als Entwurf zur Verfügung stehen. Inhaltlich muss

sie auf dem Stand der Technik aufbauen, in sich widerspruchsfrei sein und einen Konsens der Ersteller wiedergeben. [HERT10, S. 1–12]

Ein Beispiel für ein technisches Regelwerk zur Visualisierung von Produktanforderungen ist der 3D-Master-Prozess (vgl. Kapitel 3.3.1). Für die Formulierung von Restriktionen für das Produkt in Prosa existieren einige Regelwerke, in denen der Satzaufbau oder zwingende Inhalte eines Restriktionssatzes definiert werden [KICK95, S. 81–96; MAYE07, S. 42–46, 106–107; POHL08, S. 99–102, 229–244; RUPP09, S. 161–245; GRAN14, S. 71–72; BAUM16, S. 438]. Beispielsweise muss in jedem Restriktionssatz ein Verbindlichkeitsindikator wie das Wort ‚muss‘ vorhanden sein [RUPP09, S. 168–171]. Spezifisch für die Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten hingegen existiert keine detailliert entwickelte Lösung, bei der auch ein klar formuliertes Regelwerk vorliegt.

3.4 D) Softwaregestützte Baubarkeitsprüfung

Software-Supported Assembly Check

In diesem Kapitel werden zunächst Methoden und Modelle beschrieben, wie Betriebsmittelfähigkeiten vorbereitet werden, um sie für die geometrische Absicherung maschinenlesbar zu machen (Kapitel 3.4.1). Anschließend werden Methoden zum Finden von montagerelevanten Produktmerkmalen, also Produktanforderungen, beschrieben (Kapitel 3.4.2). In Abschnitt 3.4.3 werden Methoden betrachtet, die einen Abgleich der gefundenen Anforderungen mit den vorbereiteten Fähigkeiten ermöglichen. Abschließend werden in Kapitel 3.4.4 Modelle und Methoden vorgestellt, wie eine Aufbereitung der Baubarkeitsprüfungsergebnisse erfolgen kann, um die Entscheidung für einen der Stellhebel (vgl. Kapitel 2.1.5) nach MÜLLER ET AL. zu unterstützen [MÜLL15, S. 554].

Grundsätzlich kann zwischen quantitativ, parametrischen Methoden und simulativ, dynamischen Methoden unterschieden werden, um eine Baubarkeitsprüfung durchzuführen [vgl. BACK17, S. 517–519]. Deshalb wird jeweils sowohl eine parametrische Aufbereitung als auch eine simulationsgerechte Aufbereitung des Produkt- und Betriebsmittelmodells betrachtet.

3.4.1 Vorbereitung der Betriebsmittelmodelle

Preparation of the Resource Models

Zur Sicherstellung einer maschinenlesbaren Beschreibung wandeln MÜLLER ET AL. die Betriebsmittelfähigkeiten in Parameter um [MÜLL15, S. 553–557]. Sie entwickeln ein Datenmodell zur Beschreibung sämtlicher Fähigkeiten in diskreter oder linearer Form und ermöglichen somit den Abgleich mit Anforderungen des Produktes. Beispielsweise definieren sie für die Baubarkeitsprüfung einer Zylinderkopfverschraubung den möglichen Drehmomentbereich als Betriebsmittelfähigkeit für den Prozesstyp „drehmomentüberwachte Verschraubung“ [MÜLL15, S. 556]. Einen vergleichbaren parametrischen Ansatz wählt beispielsweise KARL [KARL14, S. 53–54]. Diese Beschreibungsweise

funktioniert für einfache geometrische Elemente bei statischer Betrachtung. Bei der geometrischen Absicherung liegen die montagerelevanten Merkmale jedoch lediglich implizit oder gar nicht in CAD-Modellen und 2D-Zeichnungen vor [PROS12, S. 29; BACK17, S. 522–523]. Der Aufwand zur Extraktion der Merkmale aus dem CAD-Modell ist sehr hoch und insbesondere bei dynamischen Betrachtungen von kinematischen Elementen stößt die parametrische Beschreibungsform an ihre Grenzen [MÜLL17, S. 258–259].

BACKHAUS ET AL. unterscheiden deshalb die digitalen Modelle der Betriebsmittel in mehrere Beschreibungsebenen:

Betriebsmittelfähigkeiten beinhalten nach BACKHAUS ET AL. die mit dem Betriebsmittel durchführbaren Prozesse inklusive beschreibender Parameter und müssen initial manuell hinterlegt werden. In Schnittstellenbeschreibungen werden mechanische und nicht-mechanische Schnittstellen zwischen verschiedenen Betriebsmittelelementen festgehalten. Die physikalische Beschreibung des Betriebsmittels beinhaltet sowohl die 3D-Geometrie als auch die ergänzende Kinematik und Positionierung im Raum zur Abbildung der Bewegungsfreiheitsgrade des Betriebsmittels. Das Verhaltensmodell ergänzt die Steuerungslogik und explizite Roboterpfade zu den Geometrie- und Kinematikinformationen zu einem Simulationsmodell. In den Identifikationseigenschaften ist ein eindeutiger Identifikationsschlüssel zu hinterlegen. Zur Einbindung der Serienprozesse sind darüber hinaus der Zustand des Gerätes und bestimmte konfigurierbare Parameter zu pflegen. Abschließend ergänzen BACKHAUS ET AL. Zusatzinformationen wie eine Gerätedokumentation. In Ergänzung zu MÜLLER ET AL. werden folglich insbesondere dynamische Elemente wie die Kinematik der Betriebsmittel sowie steuerungs-technische Parameter ergänzt. [BACK17, S. 517–519]

Auch für die virtuelle Absicherung von Softwaremodulen in der virtuellen Inbetriebnahme werden Simulationsmodelle benötigt. Die 2002 von LOFERER beschriebene Problematik, dass CAD-Modelle für die 3D-Simulation meist aufwändig aufbereitet werden müssen [LOFE02, S. 51], ist auch heute noch aktuell. Die vorhandenen Kataloge von Montagesystemherstellern für Simulationsmodelle der Betriebsmittel sind hingegen besonders für Standardkomponenten stark gewachsen. Im Sondermaschinenbau sind simulationsfähige Modelle jedoch nur selten vorhanden, sodass dort weiterhin die Aufbereitung der statischen 3D-Daten erforderlich ist.

Diverse Quellen beschreiben relevante Eigenschaften eines CAD-Modells, die für die 3D-Simulation vorliegen müssen. Zunächst muss die Platzierung des Betriebsmittels im Raum in Relation zum Produkt beschrieben werden [BACK17, S. 530–533]. Damit einher geht die Fixpunktdefinition als Nullpunkt der Kinematik [MEET08, S. 30]. Die Einzelbauteile des zu simulierenden Betriebsmittels müssen als 3D-Modell vorliegen [WEIN05, S. 55]. Es muss mindestens jede bewegliche Baugruppe als gesondertes Bauteil im CAD-Modell enthalten sein. Darüber hinaus wird die Kinematik inklusive der Gelenkpunkte, Einschränkungen oder Anschläge der Bewegungsfreiheit sowie Freiheitsgrade benötigt [BECK10, S. 335].

3.4.2 Automatisches Finden von Anforderungen im CAD-Produktmodell

Automatic Detection of Requirements in the CAD Product Model

Die montagerelevanten Merkmale eines Produktes, also die Produkthanforderungen, werden in aller Regel nicht in dem CAD-Modell des Produktes abgebildet oder gesondert hervorgehoben. Featurebasierte Ansätze ermöglichen es zwar Anmerkungen als sogenannte Product Manufacturing Information (PMI) an die montagerelevanten Merkmale oder Features, zu platzieren (Bild 3.10). Die aufwändige Pflege der PMI insbesondere in einem hoch volatilen und variantenreichen Umfeld stellt sich aber als nicht praktikabel heraus. Deshalb bedarf es neuartiger Ansätze für die Identifikation montagerelevanter Produktmerkmale. [KITS14, S. 12–130; BACK17, S. 522–523]

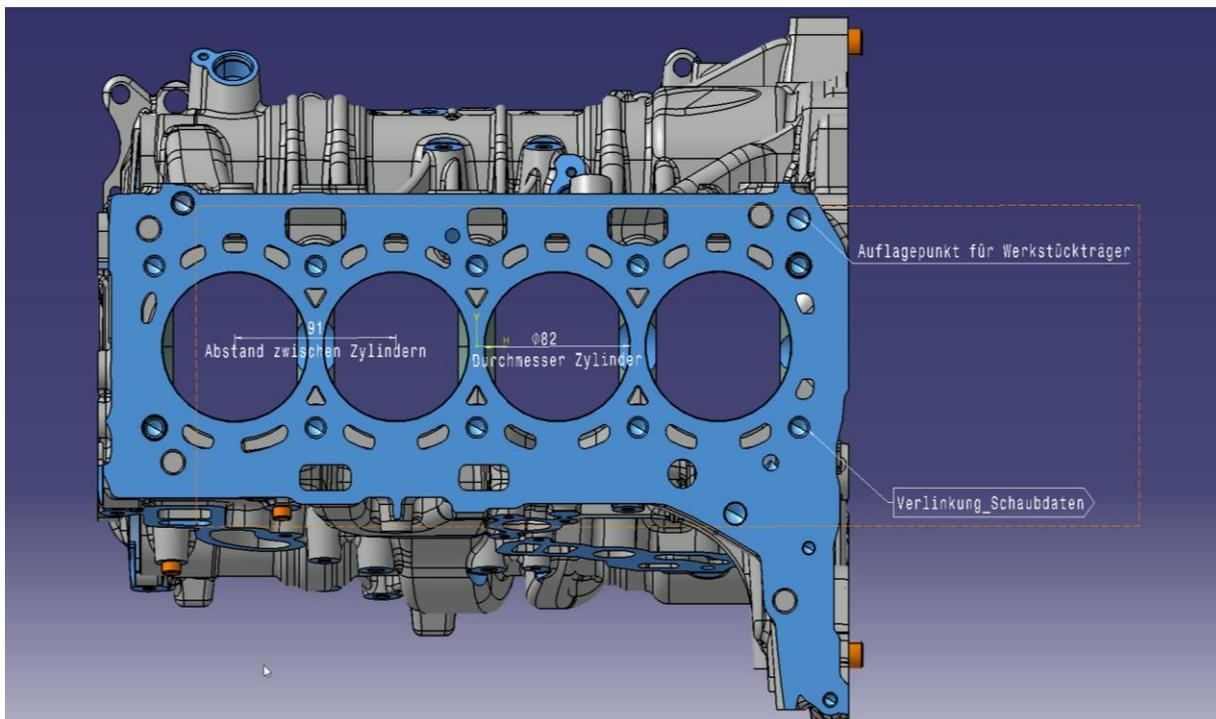


Bild 3.10: Product Manufacturing Information an einem Kurbelgehäusemodell

Product Manufacturing Information in a Model of a Crankcase

Moderne CAD-Konstruktionssoftwarelösungen wie CATIA V5 arbeiten bereits featurebasiert. Ein CAD-Feature entspricht jedoch nicht dem Verständnis montagerelevanter Merkmale in dieser Arbeit. Vielmehr ist ein Feature in CAD-Systemen zum Beispiel ein Konstruktionselement für Fertigungsprozesse wie zum Beispiel Fasen oder Rundungen [STEK07, S. 149]. Montagerelevante Merkmale bestehen beispielsweise aus der Kombination verschiedener Konstruktionselemente (z. B. Greifflächen, Abdichtgeometrien), aus Lageinformationen von Verbindungselementen (z. B. Position Schraubkopfmittelpunkt) oder der Kombination mehrerer Bauteile (z. B. Fügeinformationen). Sie sind folglich komplizierterer Natur als Fertigungsmerkmale. Zudem sind die Feature-Informationen nicht immer verfügbar, da sie aus Gründen des Know-How-Schutzes teilweise nicht an den OEM weitergegeben werden [STEK07, S. 145]. Solche Konstruktionsmodelle beinhalten folglich keine Konstruktionshistorie (vgl. Bild 3.11).



Bild 3.11: Vergleich eines CAD-Modells ohne (links) und mit (rechts) Konstruktionshistorie

Comparison of a CAD Model without (left) and with (right) the Design History

BACKHAUS ET AL. erarbeiten eine Methodik zur automatischen Ermittlung von Montagereihenfolgerestriktionen durch einen Assembly-by-Disassembly-Ansatz. Darüber hinaus benötigte Informationen ergänzen sie manuell, wodurch der Pflege-Aufwand für die in dieser Arbeit relevanten Punkte weiterhin sehr hoch bliebe. [BACK17, S. 525]

Darüber hinaus existieren Algorithmen zur indexbasierten, geometrischen Ähnlichkeitssuche oder automatischen Merkmalerkennung in CAD-Modellen. Diese werden unter den Sammelbegriffen 3D Shape Retrieval Methoden oder Feature Engineering zusammengefasst [TALL18; DOBK19]. Dabei wird mittels spezieller Analyseverfahren eine repräsentative Formbeschreibung in einen Index oder Featurevektor umgerechnet.

Eine einfache mögliche Vorgehensweise sind sogenannte Shape Distribution Algorithmen. Bei dem sogenannten D2-Shape Distribution Algorithmus wird beispielsweise mehrfach der euklidische Abstand zwischen zwei beliebig positionierten Punkten am CAD-Modell gemessen. Das Ergebnis wird in einer Wahrscheinlichkeitsverteilung aufbereitet. Damit wird angegeben, welche Abstände wie häufig vorkommen. Ist das Ergebnis der gleichen Analyse für ein weiteres Bauteil sehr ähnlich verteilt, sind diese Bauteile zu großer Wahrscheinlichkeit ähnlich zueinander. Das Ergebnis kann beispielsweise mit Algorithmen zum Vergleich zweier Funktionen aus der Signalverarbeitung analysiert werden. [DOBK19]

Bild 3.12 zeigt den Vergleich von CAD-Modellen von 5 Panzern (schwarz) mit 6 Autos (grau) aus DOBKIN ET AL. [DOBK19]. Autos und Panzer können in dem Beispiel anhand des unterschiedlichen Kurvenverlaufs gut auseinandergehalten werden.

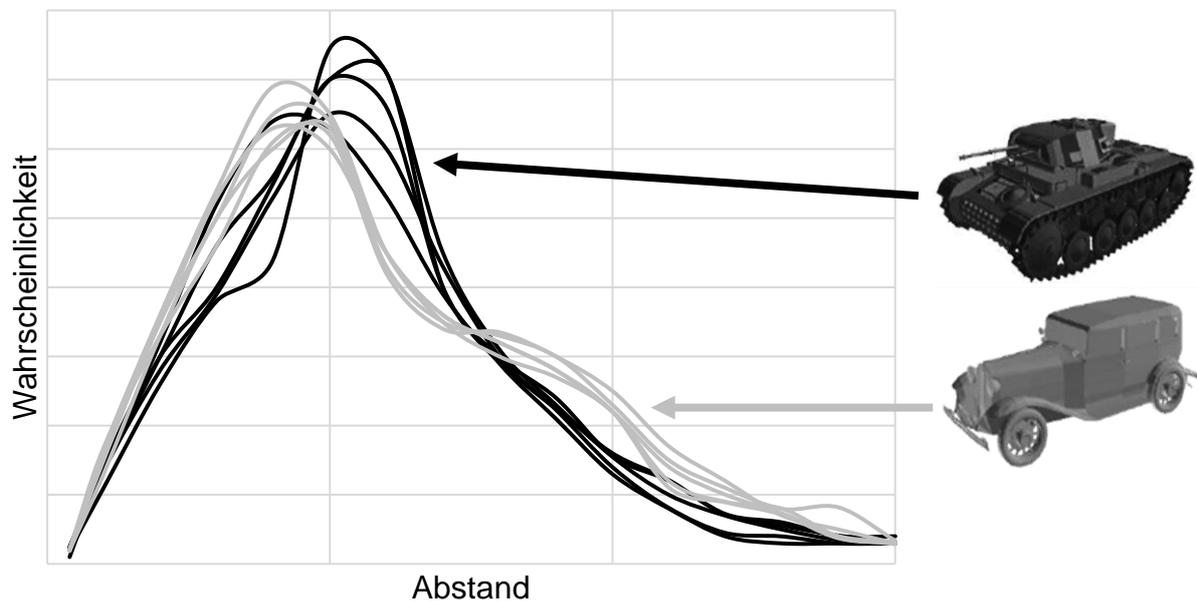


Bild 3.12: Shape Distribution Algorithmus in Anlehnung an DOBKIN ET AL. [DOBK19]

Shape Distribution Algorithm Following DOBKIN ET AL.

Ähnlich arbeitet das sogenannte „Section Coding“ [BERC97]. Dabei werden Polygone des CAD-Modells erzeugt, diese in Teilflächen oder Sektoren zerlegt und ihr Flächenanteil gemessen. Diese Flächenanteile werden in einen Feature-Vektor hinterlegt und dienen als Ähnlichkeitsmaß. [BERC97, S. 160–166]

Die Feature Selection and Interpretable Feature Transformation Methode (FS-IFT) stellt eine Abwandlung des Feature Engineerings dar und ist nach TALLÓN-BALLESTEROS ET AL. in 2 Phasen zu unterteilen (Bild 3.13). In Phase 1 werden die relevanten Trainingsdaten aufbereitet und ein relevantes Feature Set ausgewählt. [TALL18, S. 282–283]

Die Auswahl und Schneidung der Trainingsdaten und die Definition eines repräsentativen Feature-Sets sind von großer Bedeutung für die erfolgreiche und effiziente Erkennung ähnlicher Merkmale. Die Features sollten sich nach BERCHTOLD ET AL. an dem menschlichen Ähnlichkeitsempfinden orientieren, da Ähnlichkeit sehr individuell und abhängig von der behandelten Zielstellung wahrgenommen wird. YAO ET AL. ergänzen, dass Features informativ und segmentierend sein müssen [YAO18, S. 17]. [BERC97, S. 152–154]

In der zweiten Phase müssen diese über mathematische oder bool'sche Operatoren kombiniert werden, woraus sich transformierte Features ergeben. Diese werden wiederum mit den Features verbunden, sodass sich insgesamt ein charakteristischer Raum ergibt, der einen repräsentativen Index für den Datensatz darstellt. [TALL18, 281-282]

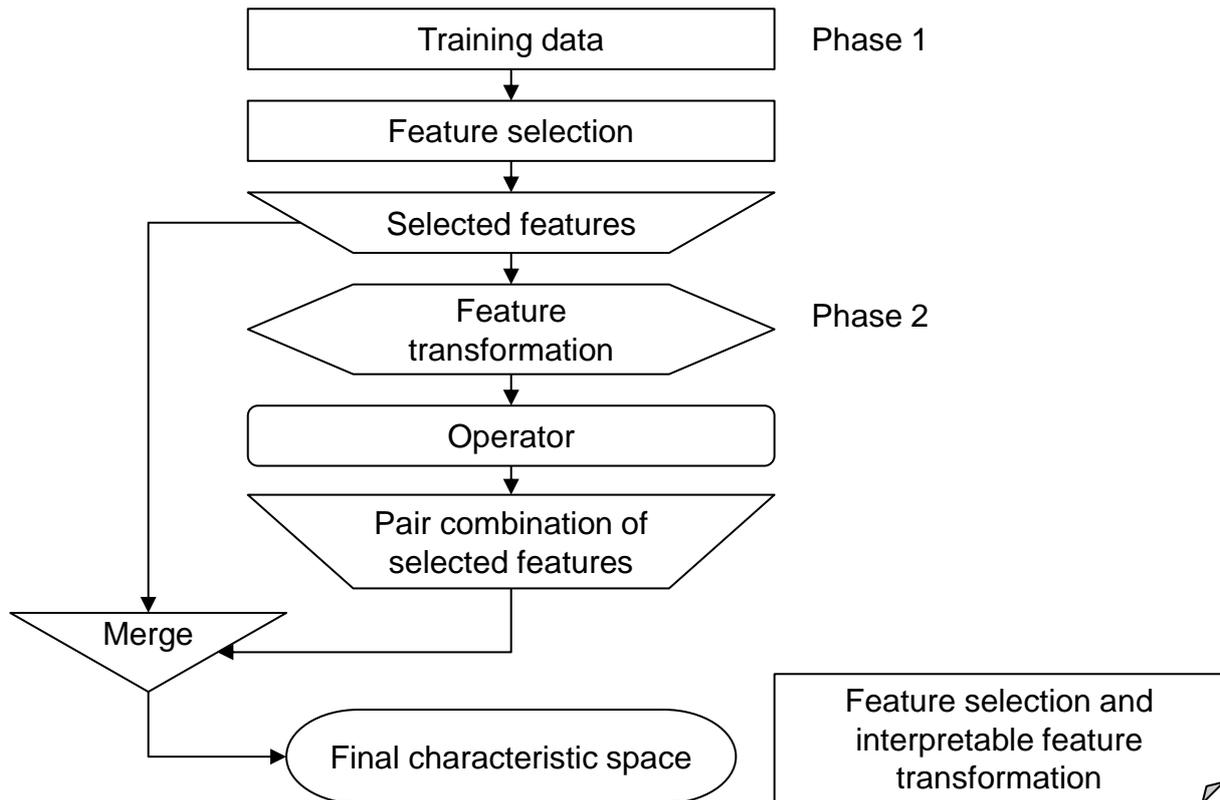


Bild 3.13: Feature Engineering Methode [TALL18, S. 283]

Method of Feature Engineering

Für die Anwendung von Feature Engineering Methoden auf CAD-Daten ist es erforderlich, dass CAD-Daten in einem datentechnisch gut verarbeitbaren Format vorliegen [ABOU06, S. 393–395].

Sind die Features initial definiert, können sie in einer Index-Datenbank abgelegt werden. Soll ein neues Element nach relevanten Merkmalen analysiert werden, werden dort zunächst die gleichen Features ermittelt und der transformierte Featurevektor wird erstellt. Mit dem erstellten Index können in der Index-Datenbank ähnliche Elemente über den Euklidabstand der Vektoren gesucht werden (Bild 3.14). [BERC97, S. 159]

Ähnlichkeitssuche

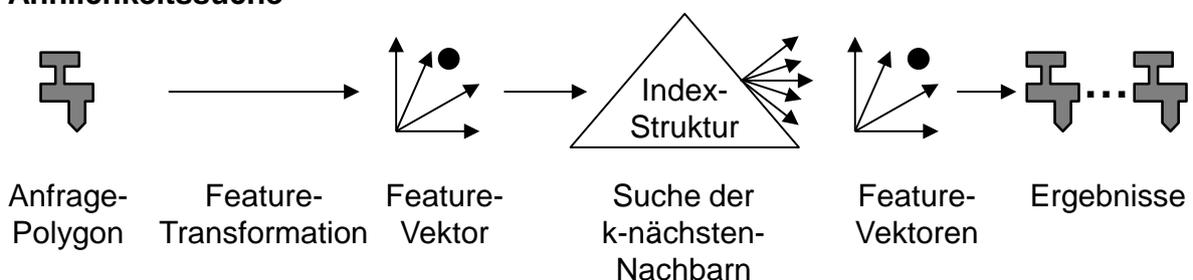


Bild 3.14: Anwendung der Ähnlichkeitssuche nach BERCHTOLD ET AL. [BERC97, S. 159]

Application of the Similarity Search by BERCHTOLD ET AL.

3.4.3 Abgleich von Produktanforderungen mit Betriebsmittelfähigkeiten

Comparison of Product Requirements with Resource Capabilities

Es gibt zwei grundlegende Stoßrichtungen in der Literatur zur Absicherung von Montageprozessen – den Ansatz durch Parameterabgleich oder simulativen Abgleich von Produktanforderungen und Betriebsmittelfähigkeiten.

Parameterabgleich

Insbesondere das Wissenschaftsfeld des Anforderungsmanagements in der Produktentwicklung setzt neben einer textuellen Beschreibung der Betriebsmittelfähigkeiten auf eine möglichst klare Parametrisierung der Restriktionen, um messbare Kriterien zur Überwachung der Güte einer Produktentwicklung zu generieren. [KICK95, S. 81–96; RUPP09, S. 318–321]

MÜLLER ET AL. entwickeln einen parametrischen Abgleich von Anforderungen und Fähigkeiten in einer Datenbank für die fähigkeitsbasierte Montageplanung [MÜLL15, S. 553–557]. Die Ausprägungen der Anforderungen und Fähigkeiten können miteinander verglichen werden, wenn das Betriebsmittel auf den gleichen Prozesstypen ausgelegt ist, den die Montage des Bauteils erfordert [MÜLL15, S. 555]. Da die Beschreibung der Anforderungen und Fähigkeiten in Datenbankform erfolgt, lassen sich mathematisch komplexere Geometrieinformationen wie erforderliche Schrauberfreigänge nur „sehr aufwändig mit tiefgreifendem Expertenwissen“ [MÜLL17, S. 258] aus den CAD-Produktmodellen extrahieren. MÜLLER ET AL. identifizieren insbesondere in der Überprüfung dieser „komplizierten geometrischen Produktmerkmale“ [MÜLL17, S. 259] weiteren Forschungsbedarf. Sie wenden ihre Methodik an, um Untersuchungen zur logistischen Machbarkeit von Bauteilvarianten durchzuführen. Diese dienen als Eingangsgröße für die Umplanung der Montage oder für die iterative Produktoptimierung. [MÜLL15; MÜLL17]

Einen vergleichbaren Ansatz beschreiben MÜLLER ET AL. in weiteren Publikationen, um nach geeigneten Betriebsmittelkombinationen für das Montageproblem (Anforderung) zu suchen. Hier wird in einer sogenannten Ontologie (Sprachdomäne) eine formalisierte Beschreibung der Anforderungen und Fähigkeiten verwendet. [MÜLL18b; MÜLL19; BAYH16]

Auch SOMANI ET AL. verwenden eine Ontologie zur Beschreibung von Fähigkeiten von Montagerobotern. Sie nutzen diese Fähigkeitsbeschreibungen, um automatisiert die Durchführung der Montageaufgabe sowie der Montagebahn zu ermitteln und daraus ein Steuerungsprogramm für den Montageroboter abzuleiten. [SOMA15, S. 108–113]

Voraussetzung für die Prüfung der Kompatibilität eines Betriebsmittels mit einem Bauteil bei den parameterbasierten Methoden ist die möglichst vollständige Beschreibung der Fähigkeiten und Anforderungen in der Datenbank oder Ontologie. Betriebsmittelfähigkeiten verändern sich in der Regel seltener als neue Bauteilvarianten entstehen

[MÜLL17, S. 253]. Somit ist die Anforderungsbeschreibung ein sehr repetitiver Prozess, wodurch der Aufwand im Produkterstellungsprozess hoch ist (vgl. Kapitel 3.4.2).

Simulationsuntersuchungen

Insbesondere im Umfeld der digitalen Fabrik wird vermehrt auf die simulative Absicherung von Montageprozessen gesetzt. Der Beschreibungsaufwand wird durch Simulationen reduziert, da bei Simulationsprogrammen ein Großteil der Beschreibung der Anforderungen und Fähigkeiten implizit in den Simulationsmodellen vorliegt. [KÖVA11, S. 6–7; SPUR13, S. 473; ABE14, 185-194; BACK17, S. 530; BRAC18, S. 288]

Kinematikuntersuchungen dienen primär zur „Darstellung und Analyse von Bewegungsabläufen“ [KÖVA11, S. 6–7], Kräfte und Momente sind nicht Betrachtungsumfang. Klassische CAD-Konstruktionssoftware oder -Viewer stoßen bei der Simulation ganzer Betriebsmittel an ihre Grenzen. Bei der Simulation vieler Planungsfälle wird zudem schnell die Performancegrenze der Geometrie-Recheneinheit erreicht, sodass die Geschwindigkeit der Simulationsdurchführung erheblich reduziert wird.

In Simulationsprogrammen lassen sich komplette Bewegungsprofile der Roboter erstellen, sodass daraus wiederum das Roboterprogramm sowie Plantaktzeiten abgeleitet werden können. Zudem können Kollisionsuntersuchungen virtuell durchgeführt werden, um Schäden an der realen Anlage zu vermeiden [BRAC18, S. 123]. Als Eingangsgrößen werden in der Regel ein 3D-CAD-Modell und ein Kinematikmodell zur Abbildung der kinematischen Freiheitsgrade verwendet. Dieses Kinematikmodell setzt sich üblicherweise aus einer kinematischen Kette der einzelnen Gelenke und starren Körper zusammen. [KÖVA11, S. 6–7; SPUR13, S. 473–474]

Die Achs- und Winkelwerte der Elemente einer Kinematik können je nach Aufgabenstellung vorwärts oder rückwärts bestimmt werden. Bei der Vorwärtskinematik werden die Winkel und Achspositionen der einzelnen kinematischen Elemente vorgegeben. Aus der Kombination der Stellung aller Achsen und Gelenke ergibt sich so eine Position des Endeffektors im Raum. Bei der Rückwärtskinematik (oder: inversen Kinematik) wird die Position und Ausrichtung des Endeffektors definiert und daraus eine mögliche Positionierung und Ausrichtung der einzelnen Rotations- und Linearachsen ermittelt [SPUR13, S. 473]. [KÖVA11, S. 7]

Bei der virtuellen Inbetriebnahme wird das Steuerungsprogramm der Montagebetriebsmittel mit der 3D-Kinematik verbunden. Dies ermöglicht tiefgehende Absicherungen exakter Programmabläufe und Roboterpfade – so müssen beispielsweise die Anforderungen des Produktes exakt bekannt sein und durch die Maschine anzufahrende Punkte (z. B. Schraubpunkte, Greifflächen) in das Steuerungsprogramm eingegeben werden. Das Steuerungsprogramm muss bereits vollständig vorliegen. Ein flächendeckender Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme ist nicht zu beobachten [KIEF06, S. 2-1 - 2-20; REIN07, S. 663–667]. Vielmehr werden virtuelle Inbetriebnahmen projektartig und punktuell in den Planungsprozess eingebunden. Mögliche Gründe hierfür sind die

nicht vollständige Reife der Softwaresysteme und die aufwändige Modellerstellung und -aufbereitung. Das führt dazu, dass beispielsweise eine virtuelle Inbetriebnahme komplizierter Förderanlagen mehrere Jahre dauern kann [KÖVA11, S. 35; BERG08, S. 61–66]. Insbesondere erfordert nach KÖVARI jede Aufwandsreduktion einen Kompromiss bei der „Abbildungstreue der Simulationsmodelle“ [KÖVA11, S. 35]. Die Wiederverwendbarkeit der Modelle ist aufgrund der fallspezifischen Aufbereitung meist nicht gegeben [KÖVA11, S. 35]. Als weiteren Nachteil führt er auf, dass virtuelle Inbetriebnahmen nur durch Simulationsexperten mit tiefgreifendem Verständnis der Steuerungstechnik durchgeführt werden können [KÖVA11, S. 36].

Die beschriebenen Probleme sind auch bei heutigen Systemen weiterhin aktuell und lassen sich auf Kinematiksimulationen weitgehend übertragen (vgl. Kapitel 2.3.2). Insbesondere in frühen Phasen der Produktentstehung ist zudem eine komplette Erstellung des Roboterprogramms nicht erforderlich, da zu diesem Zeitpunkt lediglich die mechanische Machbarkeit abgesichert werden soll. Daraus leiten BACKHAUS ET AL. ein vierstufiges Absicherungsvorgehen ab (Bild 3.15). Es ist für die unternehmensspezifischen Anwendungsfälle zu prüfen, welcher Detailgrad der Untersuchung erforderlich ist [BACK17, S. 530]. Zunächst wird bei dem *qualitativen / quantitativen Abgleich* überprüft, ob Fähigkeiten und Anforderungen, die sich durch „einfache eindimensionale Parameter“ [BACK17, S. 530] beschreiben lassen, zueinander passen. Durch diesen Schritt sollen geeignete Betriebsmittel für die Simulation ausgewählt werden. Als Beispiele für solche Parameter werden Haltekräfte, Drehmomente, der Schraubkopftyp sowie Toleranzen genannt. [BACK17, S. 526–530]

Dieser Schritt entspricht bei MÜLLER ET AL. der Identifikation der betroffenen Prozesse und Stationen sowie dem Anforderungs- und Fähigkeitsabgleich [MÜLL15, S. 554].

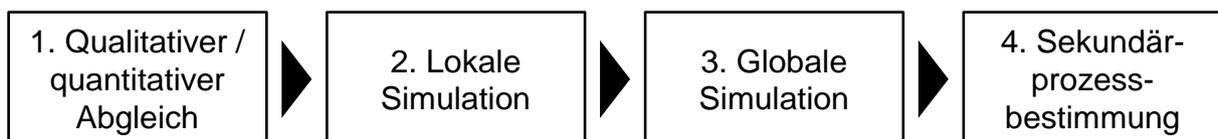


Bild 3.15: Anforderungs- und Fähigkeitsabgleich nach BACKHAUS ET AL. [BACK17, S. 527]

Comparison of Requirements and Capabilities by BACKHAUS ET AL.

Bei der anschließenden *lokalen simulativen Prüfung* werden Zugänglichkeiten von Anforderungen durch bauteilberührende Betriebsmittelkomponenten, also Endeffektoren wie zum Beispiel Schraubspindeln [BACK17, S. 532], abgesichert. Dafür gehen BACKHAUS ET AL. davon aus, dass die Montagepfade in den Anforderungen beschrieben sind und während einer Kollisionsprüfung abgearbeitet werden können. [BACK17, S. 530]

Als dritter Schritt der Montageabsicherung nach BACKHAUS ET AL. werden der lokalen Simulation alle weiteren geometrischen Elemente der Montagestation (z. B. Zäune, Förderbänder) hinzugefügt. Nun werden Kollisionsuntersuchungen mit der gesamten Peripherie der Montagestation durchgeführt und „nicht erreichbare Zielposen werden erkannt“ [BACK17, S. 530]. Die Erreichbarkeitsprüfung für Handhabungsprozesse wird

gesondert beschrieben. Dabei ist die Kinematik zu berücksichtigen, sowie eine effiziente Bahnplanung sicherzustellen. Dieser Prozessschritt wird als *globale simulative Prüfung* bezeichnet. [BACK17, S. 530–532]

BACKHAUS ET AL. nutzen die ersten drei Schritte ihres Absicherungsvorgehens, um geeignete Betriebsmittel für die geforderten Montageoperationen zu finden. Nachdem somit die primären Montageprozesse abgesichert wurden, können ergänzend die Sekundärprozesse wie das Zuführen der Bauteile oder die Übergabe des Produktes zwischen den Montagestationen betrachtet werden. [BACK17, S. 532]

3.4.4 Standardisierte Aufbereitung der Baubarkeitsprüfungsergebnisse

Standardized Preparation of the Results of the Assembly Check

MÜLLER ET AL. identifizieren drei Stellhebel im Rahmen der iterativen Produktoptimierung, um Baubarkeitskonflikte aufzulösen (Kapitel 2.1.5). Basis für eine fundierte Auswahl eines Stellhebels ist eine aussagekräftige Aufbereitung der Baubarkeitskonflikte. Gemäß der VDI-Norm 3633 wird die Auswertungserstellung in die drei Phasen der Datenaufbereitung, Ergebnisinterpretation und Bewertung eingeteilt [VDI18].

Zur Aufbereitung der Daten müssen die relevanten Daten ausgewählt, sortiert, formatiert und derart aufbereitet werden, dass sie für die Ergebnisinterpretation bereitstehen. Hier können Methoden der Statistik und Präsentationstechniken verwendet werden. [MEIß10, S. 38–39]

Bei der Ergebnisinterpretation müssen die aufbereiteten Daten in Informationen gewandelt werden, indem Beziehungen zwischen den Daten hergestellt werden und Ursachen analysiert werden. So kann die Zielerfüllung des betrachteten Systems für den jeweiligen Anwendungsfall bewertet werden.

Für die Datenaufbereitung werden in diesem Kapitel Methoden und Modelle erläutert. Eine sehr simple Art der Datenaufbereitung ist die Identifikation von Abweichungen vom Soll-Zustand eines Systems [MEIß10, S. 35]. Mittels binärer Werte kann die Zielerfüllung beschrieben werden, indem eine Übereinstimmung mit dem Sollzustand mit 1 und eine Abweichung mit 0 bewertet wird. Eine vollständige Erfüllung des Soll-Zustands ist gegeben, wenn alle bewerteten Systemeigenschaften mit 1 bewertet werden [BOSS07, S. 142–148; STÖC10, S. 65–66]. Wenn mit den Betriebsmittelfähigkeiten alle Anforderungen eines Produktes erfüllt werden, kann das Produkt mit den vorhandenen Montagebetriebsmitteln montiert werden. Es gibt verschiedene Arten den Erfüllungsgrad zu berechnen (vgl. z. B. Bild 3.16). Der sogenannte M-Koeffizient (auch: Simple-Matching-Koeffizient) zweier Objekte wird durch die Bildung des Quotienten der gleichermaßen erfüllten und gleichermaßen nicht erfüllten Merkmale mit allen Merkmalen errechnet. [STÖC10, S. 66; WENT15, S. 167–168]

Der J-Koeffizient (auch: Tanimoto- bzw. Jaccard-Koeffizient) hingegen berechnet sich durch den Quotienten aus allen gleichermaßen erfüllten Eigenschaften zweier Objekte

mit allen mindestens durch ein Objekt erfüllten Merkmale [STÖC10, S. 66; WENT15, S. 167–168].

$$M_{ik} = \frac{a + d}{a + b + c + d} \quad J_{ik} = \frac{a}{a + b + c}$$

- | | | |
|---|--|-------|
| a | Anzahl der Merkmale, die bei beiden Objekten vorliegen | (1;1) |
| b | Anzahl der Merkmale, die bei Objekt 1 nicht vorliegen und bei Objekt 2 vorliegen | (0;1) |
| c | Anzahl der Merkmale, die bei Objekt 1 vorliegen und bei Objekt 2 nicht vorliegen | (1;0) |
| d | Anzahl der Merkmale, die bei beiden Objekten nicht vorliegen | (0;0) |

Bild 3.16: Formeln zur Berechnung des J- und M-Koeffizienten

Formulas for the Calculation of the J- and M-Coefficient

EILERS verwendet eine ähnliche Betrachtungsweise zur Darstellung der Kompatibilität von Produkt und Betriebsmittel in einer Produkt-Montage-Morphologie (PMM, Bild 3.17) [EILE14, S. 60].

Prozessschritte und relevante Produktmerkmale				
Prozessschritt	Produktmerkmale / Bezeichnung	Ausprägungen / potentielle Produktveränderungen		
		Ausprägung 1	Ausprägung 2	...
Schrauben fügen	Lage der Schraubpunkte	Verschiebung Schraubpunkt 1	Verschiebung Schraubpunkt 2	...
Gehäuse greifen	Greifpunkte	Greifpunkte Typ 1	Greifpunkte Typ 2	...
...

Auswirkung auf die Gestaltung des Montagesystems	
Beeinflusstes Systemelement	Beschreibung der Auswirkung
Mehrfachspindel	Stichmaß/Abstand der Spindeln
Greifer	Aufnahmepunkte des Greifers
...	...

○ Produkt A
△ Produkt B

Bild 3.17: Produkt-Montage-Morphologie nach EILERS [EILE14, S. 85]

Product-Assembly-Morphology by EILERS

Für einzelne Prozessschritte werden die Fähigkeiten in Form möglicher Ausprägungen der Produktmerkmale beschrieben, also bereits in Anforderungen übersetzt. Dafür werden zeilenweise die montagerelevanten Produktmerkmale und spaltenweise mögliche Ausprägungen aufgetragen. Neben den Prozessschritten werden zu jedem Produktmerkmal die Systemelemente aufgelistet, die durch einen Baubarkeitskonflikt beeinflusst werden, sowie Auswirkungen von Konflikten beschrieben. [EILE14, S. 84–85]

Die Ausprägungen der Merkmale bei spezifischen Produkten können in der PMM, wie in Bild 3.17 dargestellt, aufgetragen werden, sodass die Abdeckung der Anforderungen dieses Produktes durch die Fähigkeiten visualisiert wird und die Kommunalität von Produkten ermittelt werden kann [EILE14, S. 60].

Für die iterative Optimierung des Produkt- und Bauteilvariantenportfolios stellen MÜLLER ET AL. einige Auswertungsformen vor, anhand derer sich die Realisierbarkeit von Bauteilvarianten ermitteln lässt [MÜLL17, S. 255–259]. MÜLLER ET AL. wenden die beschriebenen Auswertungen bereits in einer frühen Phase der Produktentwicklung an, in der noch keine CAD-Modelle vorliegen [MÜLL17, S. 258]. Die Übertragbarkeit der Auswertungen auf Geometrieuntersuchungen wird betont [MÜLL17, S. 259].

Die matrixförmige *Heatmap der Variantenkommunalität* wird durch zwei Achsen aufgespannt, die die einzelnen Produkte enthalten (Bild 3.18). Für die Erstellung der Heatmap werden die Varianten eines Produktes mit denen eines anderen Produktes verglichen. Stimmen alle Varianten überein, sind die Bauteile zu 100 % gleich und das Schnittfeld der beiden Produkte kann dementsprechend grün eingefärbt werden. Mit abnehmender Übereinstimmung der Bauteilvarianten wechselt die Feldfarbe von grün über gelb nach rot. Rote Felder stellen demnach dar, dass die zwei verglichenen Produkte aus sehr unterschiedlichen Bauteilvarianten aufgebaut sind. Die Heatmap spiegelt folglich einen reinen Vergleich von Produkten wider und berücksichtigt keine Informationen über den Montageprozess oder die Betriebsmittel. [MÜLL17, S. 255]

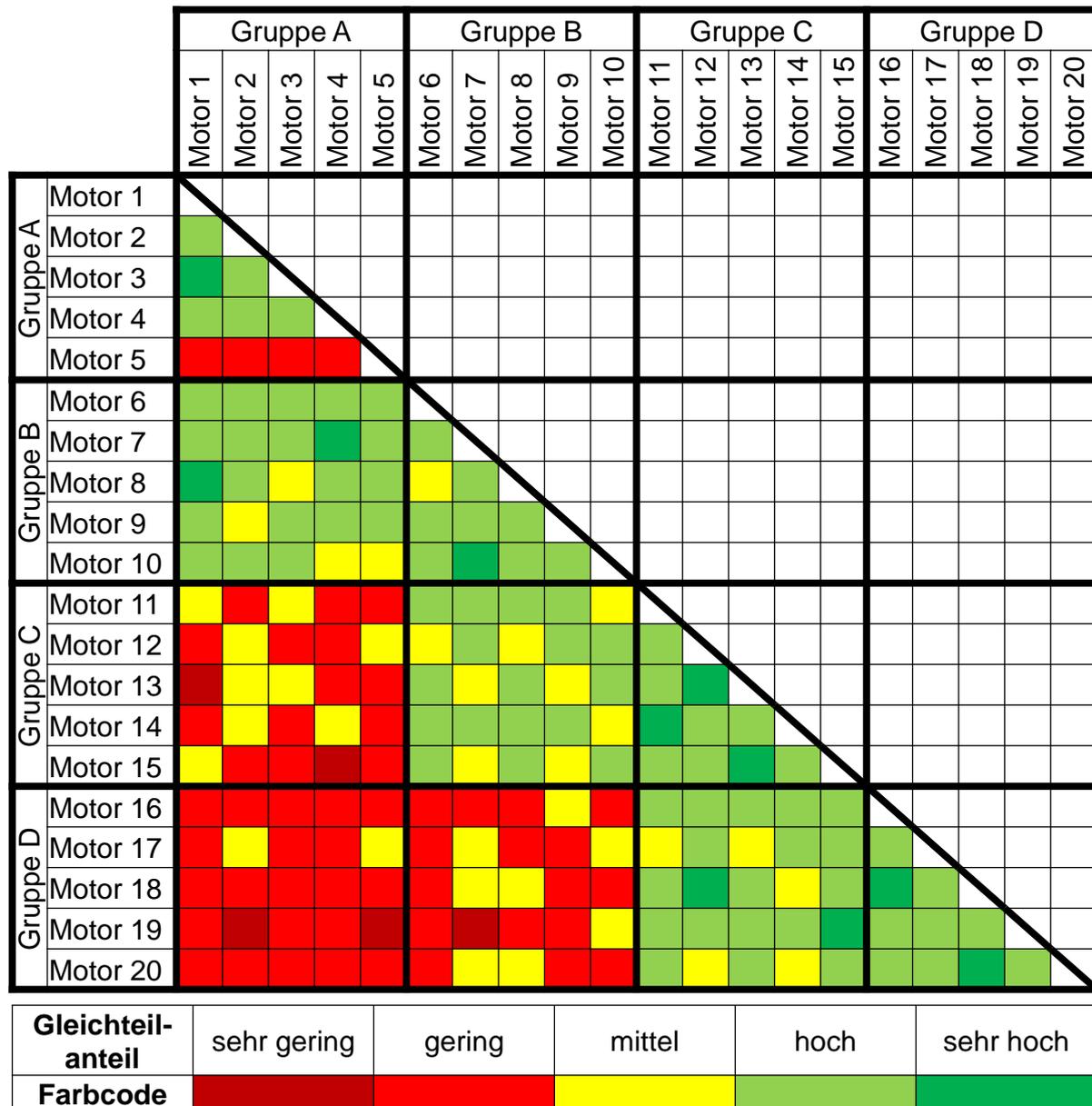


Bild 3.18: Heatmap der Variantenkommunalität nach MÜLLER ET AL. [MÜLL17, S. 256]

Heatmap of the Commuality of Variants MÜLLER ET AL.

Der *Abgleich ‚Stationskapazitäten‘* hingegen ermöglicht einen Vergleich der Variantenzahl einzelner Bauteilarten mit der Anzahl vorhandener Anstellplätze, welche als „Stationskapazität“ bezeichnet wird [MÜLL17, S. 257]. Die Variantenzahl stellt folglich die Anforderung dar, die Stationskapazität die Fähigkeit. In der Tabelle werden in den Spalten die Bauteile aufgetragen und in den Zeilen werden je Montageband die Variantenzahl und Stationskapazität in einem bestimmten Zeitraum eingetragen (Tabelle 3.2). Die Einfärbung der Variantenzahl gibt an, ob ein Baubarkeitskonflikt vorliegt. [MÜLL17, S. 256–257]

Tabelle 3.2: Abgleich der Variantenzahl mit den Anstellgrenzen nach MÜLLER ET AL.
[MÜLL17, S. 257]

Comparison of the Number of Variants with the Limit of the Station by MÜLLER ET AL.

Montage- linie	Überlapp- zeitraum	Vormontage		Endmontage			Kapazitäts- überschreit- ungen
		Zünd- kerze	Auslass- Nocken- welle	Abgas- turbo- lader	Saug- anlage	...	
Linie A	Gen. n / n+1	9	10	2	2	2	0
	Gen. n+1 / n+2	12	4	6	3	2	1
	Kapazität Montage	12	10	4	4	3	
Linie B	Gen. n / n+1	12	6	2	2	2	0
	Gen. n+1 / n+2	9	9	5	3	3	2
	Kapazität Montage	12	8	4	4	4	

Kapazität unterschritten

Kapazität gerade eingehalten

Kapazität überschritten

3.5 Forschungslücke und konkrete Handlungsbedarfe

Research Gap and Concrete Required Action

In diesem Kapitel werden die Anforderungen aus Kapitel 2.5 mit dem Stand der Technik verglichen. Es wird ermittelt, welche Anforderungen bereits durch Methoden und Modelle aus der Forschung und Industrie erfüllt werden können und wo Forschungslücken bestehen.

3.5.1 Forschungslücke zu Handlungsziel A: Basismethoden und -modelle zur Softwareunterstützung

Research Gap for Target A: Basic Methods and Models for Software-Support

Mit dem Handlungsziel A wird die Entwicklung von Basismodellen und -methoden für die Prozessabsicherung gefordert. Tabelle 3.3 zeigt einen Überblick über den Beitrag der betrachteten Quellen zur Erfüllung der jeweiligen Anforderungen. Dies wird im Folgenden je Anforderung erläutert. Grundsätzlich ist erkennbar, dass zu den Anforderungen zwar Modelle oder Methoden bestehen, dass jedoch für das Anwendungsfeld der Softwareunterstützung in der proaktiven Produktbeeinflussung und geometrischen Absicherung weiterer Handlungsbedarf besteht.

Tabelle 3.3: Forschungslücke für das Handlungsziel A*Research Gap for Target A*

Nr.	Anforderung	Lotter und Wiendahl	Müller (et al.)	Backhaus, Hammerstingl, Reinhart, Michniewicz	Eilers	Leistner et al.	Siemens
A1	Strukturierung der Prozesse und Betriebsmittel						
A2	Zentrales Datenmodell zur Verknüpfung von Metainformationen über Produkte, Prozesse und Betriebsmittel						
A3	Automatische Erzeugung von Bauzuständen des Produktes						

= nicht erwähnt = erwähnt = relevant = teilweise erfüllt = erfüllt

A1 Strukturierung der Prozesse und Betriebsmittel

Es existieren diverse Strukturierungsmodelle für Prozesse. Die Modelle von MÜLLER, LOTTER UND WIENDAHL sowie HAMMERSTINGL UND REINHART sind sehr ausgereift und bilden eine Vielzahl der Montageprozesse ab. Sie können aber nur als Ausgangslage für eine unternehmensspezifische Klassifizierung der Prozesse dienen. HAMMERSTINGL UND REINHART ergänzen die Klassifizierung der Prozesse um Fähigkeitsparameter je Prozess. Sie ergänzen die Fähigkeitsparameter folglich nicht auf Ebene der Betriebsmittel.

Für die Einteilung von Betriebsmitteln stellt MÜLLER eine funktionsorientierte Einteilung der Prozesse vor. Diese Modularisierung wird besonders als Unterstützung zur Gestaltung von Betriebsmitteln verstanden. Insbesondere im Rahmen einer dynamischen Untersuchung der Baubarkeit ist hingegen die Abbildung einer bewegungsorientierten Einteilung der Betriebsmittel von hoher Relevanz.

Besonders hervorzuheben ist das Konzept von BACKHAUS ET AL.. Sie beschreiben anders als die anderen vorgestellten Quellen eine Methode zur Klassifizierung und definieren darin explizit, dass eine Klassifizierung von Prozessen und Betriebsmitteln unternehmensspezifisch aufzubauen ist. Dieser Ansatz soll weiterverfolgt werden. Dabei soll jedoch eine klarere Trennung zwischen Prozess und Betriebsmittel erfolgen. Zudem ist bei der Methode aufbauend auf dem Modell von MÜLLER eine bewegungsorientierte Gliederung von Betriebsmitteln zu entwickeln. Die Beschreibung der Fähigkeiten muss auf Ebene der einzelnen Betriebsmittelelemente ermöglicht werden. Eine

Beschreibung auf Ebene der Prozesse wie bei HAMMERSTINGL UND REINHART ist nicht ausreichend. Die Methodik ist so aufzubauen, dass die Klassifizierung und Fähigkeitsbeschreibung zur Erfüllung aller Handlungsziele Verwendung finden kann.

A2 Zentrales Datenmodell zur Verknüpfung von Metainformationen über Produkte, Prozesse und Betriebsmittel

Das Datenmodell von MÜLLER ET AL. stellt bereits ein weit entwickeltes Modell dar. Es deckt eine Vielzahl der in der Anforderung A2 geforderten Aspekte ab. Die Klassifizierung der Prozesse ist sehr einfach gehalten. Zudem lassen sich in dem Modell lediglich diskrete Werte oder lineare Wertebereiche abbilden. MÜLLER ET AL. weisen explizit darauf hin, dass das Modell zur Abbildung komplizierter Geometrien weiterentwickelt werden muss.

LEISTNER ET AL. ermöglichen zwar die Ablage weiterer Metadaten wie Zustellbewegungen und Fügekurven und verknüpfen sämtliche Informationen objektorientiert mit dem CAD-Produktmodell. Sie ermöglichen jedoch nicht die Abbildung mechanischer Freiheitsgrade, sondern lediglich die Abbildung konkreter Fügepfade. Darüber hinaus kann in dem Modell von LEISTNER ET AL. keine Linienbelegung berücksichtigt werden. Dies ist auch bei BACKHAUS ET AL. und MICHNIEWICZ ET AL. nicht möglich. Sie legen hingegen einen stärkeren Fokus auf die Klassifizierung der Prozesse in ihrem Datenmodell. Die Klasse Grundstruktur erlaubt explizit auch die Ablage von Zusatzinformationen wie kinematischen Informationen oder Dokumenten. Zudem bilden MICHNIEWICZ ET AL. unterschiedliche Planungsfälle ab.

Das Modell von MÜLLER ET AL. soll im Folgenden weiterentwickelt werden, da es die Zusammenhänge der Metadaten bereits sehr umfassend abbildet. Die Klassifizierung der Prozesse und Betriebsmittel muss jedoch weiter ausdetailliert werden und die Montagestationen müssen in einzelne Baugruppen eingeteilt werden können. Zudem müssen ganze Simulationsfälle inklusive der CAD-Modelle und kinematischen Modelle eingefügt werden können. Zuletzt ist die Szenarienfähigkeit wie bei MICHNIEWICZ ET AL. zur Abbildung unterschiedlicher Planungsfälle in das Datenmodell zu integrieren.

A3 Automatische Erzeugung von Bauzuständen des Produktes

Zur automatischen Erzeugung wurden zwei grundlegende Ansätze vorgestellt. Die Abbildung in einer Standardsoftware wie dem IPA-Modul von Siemens Teamcenter hat den Vorteil einer professionell und schnell verfügbaren Lösung im Markt. Voraussetzung für die Anwendung ist jedoch die Abbildung der Montageprozesse und PDM-Struktur in der Datenbankanlösung von Siemens Teamcenter. Zudem ist insbesondere in der frühen Phase der proaktiven montagegerechten Produktgestaltung eine Anwendung der Softwarelösung nur mit sehr hohem Aufwand möglich, da manuell eine eindeutige Zuordnung jeder Bauteilvariante zum Montageprozessschritt erfolgen muss. Den gleichen Ansatz wählen LEISTNER ET AL., wodurch auch ihr Ansatz in der proaktiven Produktgestaltung nur mit großem manuellem Aufwand valide einsetzbar ist.

Die Umstrukturierung des Baumes soll grundsätzlich übernommen werden. Als Handlungsbedarf ergibt sich, dass nur bei der Erstellung des Strukturbaums in Montagereihenfolge eine Softwarelösung zum Einsatz kommen darf. Es muss eine Baumstruktur entwickelt werden, die es erlaubt in gängigen CAD-Konstruktionssystemen und Viewern mit wenigen Klicks den Bauzustand in einem bestimmten Prozessschritt zu erzeugen. Es muss zudem möglich sein, auch ohne vorliegende Zuweisung des Einzelbauteils zur Montagestation einen möglichst korrekten Bauzustand des Produktes auf Basis bestehender Vorrangfolgen zu erzeugen. So soll eine Anwendung auch bei proaktiver Produktgestaltung möglich werden.

3.5.2 Forschungslücke zu Handlungsziel B: Rekonfigurationsräume

Research Gap for Target B: Reconfiguration Areas

Das Handlungsziel B fordert die Definition von Rekonfigurationsräumen, um schon in der Vorentwicklung erste Produktkonzepte montagegerecht beeinflussen zu können. Die Erfüllung der Anforderungen ist in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.4: Forschungslücke für das Handlungsziel B

Research Gap for Target B

Nr.	Anforderung	Karl	Backhaus et al.	Siedelhofer et al.	Brunner	Halfmann	Eilers
B1	Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen						
B2	Definition von Rekonfigurationsräumen						

○ = nicht erwähnt ◐ = erwähnt ◑ = relevant ◒ = teilweise erfüllt ◓ = erfüllt

B1 Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen

Die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Methoden zur Ermittlung des Rekonfigurationsbedarfes gehen primär von geänderten Produktkonzepten aus. Dies schränkt den Betrachtungsraum bereits erheblich ein und reduziert die Abstraktheit der Betrachtung, sodass die Auswirkung von Produktänderungen besser vorstellbar wird. Deren Auswirkung wird daraufhin wie bei KARL jedoch sehr detailliert ermittelt. Der dafür erforderliche Aufwand ist in der frühen Produktentwicklungsphase nicht angemessen und es wird eine Pseudo-Genauigkeit erzielt, da die Reife der vorliegenden Produktkon-

zepte häufig noch nicht so weit fortgeschritten ist. Dies kann schnell zu dem Ausschluss von Produktkonzepten führen, die jedoch lediglich einer geringen Überarbeitung bedürfen, um deutlich montagegerechter zu werden. Die betrachteten Methoden zielen folglich in erster Linie nicht auf die frühe Entwicklungsphase ab. BRUNNER ergänzt diese Produktsicht mit der Flexibilität der Betriebsmittel. Flexible Betriebsmittel müssen bei der Rekonfigurationsplanung nicht tiefer betrachtet werden.

Diese zwei Dimensionen sollen auch in dem zu entwickelnden Konzept berücksichtigt werden. Es sollen nur für unflexible Montagestationen, die von kritischen Produktänderungen betroffen sind, Rekonfigurationsräume entwickelt werden. Dadurch soll der Arbeitsaufwand für die Montageplaner minimiert werden.

B2 Definition von Rekonfigurationsräumen für die Produktgestaltung

Bei der Entwicklung von Rekonfigurationsmaßnahmen wird von SIEDELHOFER ET AL., BRUNNER und HALFMANN ET AL. die Berücksichtigung strategischer Unternehmensziele als wichtig erachtet. Dies soll bei der Entwicklung der Methode zur Definition von Rekonfigurationsräumen aufgegriffen werden. Da sich diese Arbeit im Umfeld der montagegerechten Produktbeeinflussung einordnet, ist diese zielorientierte, technische Lösungsfindung auf Betriebsmittelseite mit der Ableitung von Mindestanforderungen an die Produktgestaltung zu kombinieren. Als Produktgestaltungsmaßnahme in der Vorentwicklung wird in der Literatur primär die Modularisierung beschrieben [vgl. BACK17; HALF14]. Bei der Integrationsplanung ist jedoch die stetige Änderung der Produkt- oder Betriebsmittelmodule nicht praktikabel, da diese dem Baukastenansatz entgegensteht. Sie kann folglich als bekannt vorausgesetzt werden. In dieser Arbeit soll deshalb die technische Gestaltung des Produktes beeinflusst werden, um primär die Schnittstellen zu Betriebsmitteln zu optimieren. Ziel der Maßnahmen ist die aufwandsarme Sicherstellung der wirtschaftlichen Montierbarkeit neuer Produktinhalte, nicht die Vermeidung neuer Produktkonzepte durch pseudo-genaue Bewertungen in der frühen Phase.

3.5.3 Forschungslücke zu Handlungsziel C: Intuitiv verständliche Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten in CAD

Research Gap for Target C: Intuitively Comprehensible Visualization of Resource Capabilities in CAD

Mit dem Handlungsziel C soll eine Visualisierung der Betriebsmittelfähigkeiten in CAD erreicht werden. Wie in Tabelle 3.5 dargestellt, wird in vielen Quellen die Notwendigkeit einer einfachen Methodik zur Kommunikation von Betriebsmittelfähigkeiten identifiziert. Es wird jedoch nur in Ansätzen zu sehr spezifischen Fragestellungen eine konkrete Visualisierungsregel aufgestellt oder Methode entwickelt.

Tabelle 3.5: Forschungslücke für das Handlungsziel C*Research Gap for Target C*

Nr.	Anforderung	Stapelkamp	Karl	Hesse	Kitsios und Haslauer	Brunner	Müller et al.	Backhaus, Reinhart, Hammerstingl	Stegemann
C1	Intuitiv verständliche Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten	◐	◐	◑	◐	○	○	○	○
C2	Identifikation produktrelevanter Darstellungsinhalte	○	○	○	○	◐	◑	◐	○
C3	Produktkompatible Visualisierungsmodelle der Betriebsmittelfähigkeiten	○	○	○	○	○	○	○	◑
C4	Regelwerk zur strukturierten Erstellung der Visualisierungsmodelle	○	○	○	◐	○	○	○	○

○ = nicht erwähnt ◑ = erwähnt ◐ = relevant ◑ = teilweise erfüllt ● = erfüllt

C1 Modell zur intuitiv verständlichen Visualisierung

Entscheidend für intuitiv verständliche Visualisierungen sind die grundlegenden Wirkungen von Visualisierung nach STAPELKAMP. Diese erfordern jedoch eine starke Anpassung für den Anwendungsfall.

Die 3D-Master-Methodik von KITSIOS UND HASLAUER zielt zwar auf den Transport von Informationen aus dem Konstruktionsprozess in den Produktionsprozess ab. Der Gedanke des CAD-Modells als zentrale Dokumentation lässt sich jedoch auch auf die Kommunikation prozessrelevanter Produktmerkmale übertragen. Zudem wird hier im Gegensatz zum Anforderungsmanagement der Ansatz verfolgt visuelle Beschreibungen als primäres Transportmedium zu wählen und Text lediglich als ergänzende Information zu verwenden. Dies kommt der Zusammenstellung von bauteilberührenden Modellen der Betriebsmittelkonstruktion der BMW Group nahe, ermöglicht aber nicht nur eine Darstellung der Restriktionen, sondern auch eine Darstellung von Fähigkeiten. Neben Textanmerkungen können über Hyperlinks auch Zusatzinformationen wie Videos verknüpft werden. Der Ansatz der voreingestellten Zustände und Ansichten ermöglicht das situationsgerechte Bereitstellen von Informationen. Darüber hinaus minimiert die assoziative Verknüpfung der Modellbausteine den Aufwand zur Pflege.

Handlungsbedarf für die Erfüllung der Anforderung C1 ist das Übertragen der ausgereiften Methoden des 3D-Masters auf die Darstellung von Betriebsmittelfähigkeiten.

Dabei sind besonders die situationsgerechte Informationsbereitstellung und die Erweiterung um dynamische Aspekte wie Prozessvideos zu berücksichtigen.

C2 Identifikation produktrelevanter Darstellungsinhalte

Produktrelevante Darstellungsinhalte sind die von BRUNNER als produktrelevante Betriebsmittelmerkmale definierten Merkmale. Aus der Ebene Prämissen und Strategie von BRUNNER ist die Linienbelegung nach MÜLLER ET AL. auch für Produktentwickler von hoher Relevanz. Die Informationen über die Montagevorrangfolge aus der Ebene 2 ist produktspezifisch. Sie soll deshalb nicht in der Betriebsmittelvisualisierung abgebildet werden. Hier soll die gemäß Anforderung A3 zu entwickelnde Bauzustandsermittlung angewendet werden. Entscheidend aus Ebene 3 des Modells nach BRUNNER sind folglich die betriebsmittelbedingten Restriktionen für das Produkt.

MÜLLER ET AL. fordern darüber hinaus nicht nur die Darstellung von Restriktionen, sondern identifizieren explizit die Notwendigkeit einer Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten. Es findet sich keine Sammlung unternehmensübergreifend gültiger, produktrelevanter Darstellungsinhalte. BACKHAUS ET AL. beschreiben im Gegenteil, dass die Sammlung der Merkmale unternehmensspezifisch erfolgen muss.

Deshalb besteht der Handlungsbedarf zur Entwicklung einer Methode zur Identifikation unternehmensspezifisch relevanter Darstellungsinhalte. Es sollen dennoch grundlegende Visualisierungsregeln in Abhängigkeit der Prozess- und Betriebsmittelklassifizierung zur Erfüllung der Anforderung A1 aufgestellt werden.

C3 Produktkompatible Visualisierungsmodelle der Betriebsmittelfähigkeiten

Ähnlich zur Identifikation produktrelevanter Darstellungsinhalte konnte keine Lösung in der Literatur ermittelt werden, wie Betriebsmittelfähigkeiten produktkompatibel dargestellt werden. Es wird lediglich die Erforderlichkeit einer Beschreibung in den CAD-Systemen ermittelt. Der Handlungsbedarf zu dieser Anforderung bleibt folglich bestehen: Die Visualisierungsmodelle müssen in einem CAD-Konstruktionssystem umgesetzt werden, sodass Konstrukteure die Visualisierungsmodelle bereits berücksichtigen können, um Bauteilentwürfe montagegerecht zu konstruieren.

C4 Regelwerk zur strukturierten Erstellung der Visualisierungsmodelle

Da keine Methodik zur Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten existiert, gibt es auch kein Regelwerk zur Erstellung eines Visualisierungsmodelles. Die 3D-Master Methodik und die darin enthaltenen Regeln zur Visualisierung von KITSIOS UND HASLAUER sollen jedoch gemäß des Handlungsbedarfes aus Anforderung C1 adaptiert werden.

Es gilt explizit technische Regeln zur Erstellung der Visualisierungsmodelle für Betriebsmittelfähigkeiten zu definieren. Darin sollen formelle und inhaltliche Vorgaben für die Visualisierung umgesetzt werden. Die einzelnen Regeln sollen in einem Regelwerk basierend auf der Prozess- und Betriebsmittelklassifizierung realisiert werden.

3.5.4 Forschungslücke zu Handlungsziel D: Automatisierung und Standardisierung der Baubarkeitsprüfung

Research Gap for Target D: Automation and Standardization of the Assembly Check

Tabelle 3.6 zeigt die Gegenüberstellung der Anforderungen zu dem Handlungsziel D mit den betrachteten Quellen. Die wichtigste Erkenntnis aus der Untersuchung des Stands der Technik in der Forschung und Industrie ist, dass es in Bezug auf das Handlungsziel D zur softwaregestützten geometrischen Absicherung Methoden oder Modelle gibt, die eine teilweise Erfüllung der Anforderungen ermöglichen, eine durchgängige Methode zur hochautomatischen Absicherung wird jedoch nicht dargestellt. Die Ansätze unterscheiden sich wesentlich in parameterbasierte Absicherungsmethoden und dynamische Untersuchungen zum Beispiel mittels Kinematiksimulationen. Lediglich BACKHAUS ET AL. beschreiben eine kombinierte Methodik. Die unterschiedlichen Ansätze werden im Folgenden näher beschrieben.

Tabelle 3.6: Forschungslücke für das Handlungsziel D

Research Gap for Target D

Nr.	Anforderung	Müller et al.	Backhaus et al.	Meeth und Schuth, Weiner, Beckers et al.	Dobkin et al.	Berchtold et al.	Tallón-Ballesteros et al.	Kövári, Spur et al.	Stöcker, Bossmann, Wentura und Pospeschill	Eilers
D1	Methode zur Vorbereitung der Betriebsmittelmodelle									
D2	Automatisches Finden von Produktanforderungen am CAD-Produktmodell									
D3	Abgleich von Produktanforderungen mit Betriebsmittelfähigkeiten									
D4	Standardisierte Aufbereitung der Baubarkeitsprüfungsergebnisse									

= nicht erwähnt = erwähnt = relevant = teilweise erfüllt = erfüllt

D1 Vorbereitung der Betriebsmittelmodelle

Die maschinenlesbare Abbildung der Betriebsmittelfähigkeiten lässt sich mit parameterbasierten Methoden wie von MÜLLER ET AL. und KARL sowie simulationsbasierten Methoden wie von BACKHAUS ET AL. realisieren. Mit den parameterbasierten Methoden

sind jedoch keine dynamischen Geometrieuntersuchungen möglich. Für dynamische Untersuchungen sind Simulationsmodelle erforderlich. Sowohl bei BACKHAUS ET AL. als auch in der virtuellen Inbetriebnahme werden jedoch keine Freiheitsgrade berücksichtigt, sondern fest definierte Achsbewegungspfade angenommen. Der Aufbau eines Kataloges mit Standardbetriebsmitteln kann den Beschreibungsaufwand erheblich reduzieren. Im Sondermaschinenbau ist aufgrund des geringen Wiederverwendungsgrades von Betriebsmitteln jedoch der Pflegeaufwand sehr hoch. Bei der Beschreibung von Regeln zur Simulationsmodell-Erstellung und relevanten Eigenschaften von Simulationsmodellen werden anwendungsspezifisch nur einzelne Aspekte betrachtet.

Handlungsbedarf zur Erfüllung dieser Anforderung ist die Kombination einer parameterbasierten Beschreibung mit Simulationsmodellen. Für parameterbasierte Baubarkeitsuntersuchungen ist eine Beschreibungsform der Parameter auf Basis der Klassifizierung (Anforderung A1) zu entwickeln, um Wiederverwendbarkeit zu gewährleisten. Diese muss in das Datenmodell (Anforderung A2) integriert werden. Es muss basierend auf den vorgestellten Modellen beschrieben werden, welche Aspekte ein Simulationsmodell beinhalten muss, um eine möglichst automatisierte geometrische Absicherung zu ermöglichen. Dabei soll die tatsächliche mechanische Flexibilität der Betriebsmittel beschrieben werden.

D2 Automatisches Finden von Produktanforderungen am CAD-Produktmodell

Aufgrund des großen Aufwands zur Pflege von PMIs sind diese nicht praktikabel für das Finden von Produktanforderungen. Die im Original-CAD-Modell enthaltenen CAD-Features können nicht verwendet werden, da sie primär Fertigungsmerkmale darstellen. Zudem sind sie aufgrund von Know-How-Schutz nicht vollständig beim OEM verfügbar. Die Methode Assembly-by-Disassembly zur Ermittlung des Vorranggraphen wird nicht benötigt, da im Umfeld der Integrationsplanung die Vorrangfolge durch Vorgängerderivate bereits weitgehend feststeht. Mittels Feature Engineering und ähnlichen Methoden aus dem Bereich der Data Analytics kann aus einer großen Datenmenge mit hohem Automatisierungsgrad ein kompliziertes Merkmal extrahiert werden.

Das Feature Engineering soll zum Finden von montagerelevanten Produktmerkmalen verwendet werden. Die Methode soll so gestaltet werden, dass sie unabhängig vom vorhandenen CAD-Format funktioniert. Zur Anwendung dieser Methode auf die CAD-Daten müssen diese in eine automatisiert verarbeitbare Form transformiert werden.

D3 Abgleich von Produktanforderungen mit Betriebsmittelfähigkeiten

Die Methoden des Anforderungsmanagements, von MÜLLER ET AL. oder die Ontologiebasierten Methoden ermöglichen auf parametrischer Ebene eine Kompatibilitätsprüfung von Anforderungen und Betriebsmittelfähigkeiten. MÜLLER ET AL. erkennen jedoch den Forschungsbedarf zur Erweiterung der parametrischen Vergleichsmethode. Durch Kinematiksimulationen kann der Untersuchungsaufwand für dynamische Analysen stark reduziert werden. Eine vollständige Abbildung aller Parameter zur Baubarkeitsprüfung in einem Simulationsmodell ist wiederum sehr aufwändig.

Üblicherweise wird bei der virtuellen Inbetriebnahme und bei Kinematiksimulationen nicht die generelle mechanische Machbarkeit, sondern ein festgelegter Bewegungspfad abgesichert. Eine vollständige virtuelle Inbetriebnahme erfordert viel Experten-Know-How in der Roboterprogrammierung oder speicherprogrammierbaren Steuerungen und ist sehr aufwändig in der Erstellung. Für die geometrische Absicherung muss noch nicht der exakte Signalfuss simuliert werden und es liegen noch nicht alle erforderlichen Eingangsgrößen vor. Bei der vierstufigen Vorgehensweise von BACKHAUS ET AL. wird eine Kombination des Parameterabgleichs mit der Kinematiksimulation vorgenommen, wodurch ein sehr strukturiertes Vorgehen für die Absicherung definiert wird.

Analog zu BACKHAUS ET AL. soll ebenfalls eine kombinierte Lösung aus Simulation und Parameterabgleich entwickelt werden. Für den Parameterabgleich soll die Methode auf MÜLLER ET AL. basieren, weil dort das Datenmodell wie oben beschrieben besonders ausgereift ist. Es soll nicht nur ein expliziter Roboterpfad abgesichert werden können, sondern es soll eine Methode zur Absicherung sämtlicher mechanischer Freiheitsgrade gefunden werden. Darüber hinaus soll ein standardisiertes Prüfverfahren definiert werden, das übertragbar auf alle Prozesstypen ist. Dabei soll die am besten geeignete Abgleichsmethode für das jeweilige Merkmal definiert werden.

D4 Standardisierte Aufbereitung der Baubarkeitsprüfungsergebnisse

Zur Aufbereitung von Analyseergebnissen sind die beschriebenen Ähnlichkeitsparameter eine sehr simple Darstellungsmethode. Da durch sie jedoch der beschriebene Sachzusammenhang sehr stark in einer Kennzahl aggregiert wird, ist ihre Aussagekraft ohne ergänzende Auswertungen nicht ausreichend.

Mit der Produkt-Montage-Morphologie wählt EILERS eine methodisch sehr plakative Darstellungsform. Sie eignet sich jedoch nicht für eine große Anzahl an Parametern und deren Ausprägungen. Die grundlegenden Vergleichsmethoden für den Vergleich der Betriebsmittel mit den Produkten sowie der Kommunalität zwischen verschiedenen Produkten findet sich auch bei MÜLLER ET AL. wieder. Bei ihrer Beschreibung verschiedener Auswertemethoden für die Baubarkeit von Bauteilvarianten nutzen sie ebenfalls die Methode zur Aggregation sowie grundlegende Visualisierungsregeln zur Farbgebung, um schnell einen Überblick über das Ergebnis zu erzeugen.

Als Handlungsbedarf ist für diese Anforderung festzuhalten, dass die Berechnungslogik nach EILERS mit den einfachen Ähnlichkeitsparametern kombiniert werden soll. Damit muss einerseits der Abgleich von Produkten mit Betriebsmitteln und andererseits der Abgleich von Produkten mit anderen Produkten dargestellt werden können. Analog zur Stationskapazitätsauswertung soll das Prinzip der Aggregation die Analyse unterstützen.

4 Übersicht über die Methodik

Overview of the Methodology

In diesem Kapitel wird aufbauend auf der Forschungslücke aus Kapitel 3.5 ein Überblick über die in dieser Forschungsarbeit entwickelte Gesamtmethodik gegeben. Die Methodik wird in zwei Dimensionen strukturiert (Bild 4.1). Einerseits dient der PEP als Orientierungsrahmen (horizontale Achse), anhand dessen bereits der praktische Handlungsbedarf abgeleitet wurde. Zum anderen wird zwischen Methoden und Modellen für die Betrachtung des Produktes, des Betriebsmittels sowie der Verknüpfung der beiden im Prozess unterschieden (vertikale Achse).

Zu den vier Forschungslücken aus Kapitel 3.5 werden jeweils Bausteine entwickelt. Diese Bausteine wirken wie im oberen Teil der Bild 4.1 dargestellt an unterschiedlichen Stellen im Produktentstehungsprozess sowie in den unterschiedlichen Betrachtungsspektren Produkt, Prozess oder Betriebsmittel. Die Nummerierung im Bild gibt die Kapitelbezeichnung im Kapitel 5 an.

Übergeordnet werden Basisbausteine (Kapitel 5.1) benötigt, die (hellgrau hinterlegt, Kapitel 5.1) die folgenden Lösungsbausteine (weiß hinterlegt, Kapitel 5.2 bis 5.4) stützen. Durch die Berücksichtigung von Rekonfigurationsräumen in der Vorentwicklung sollen die Produktkonzepte bereits in der frühen Entwicklungsphase proaktiv, montagegerecht beeinflusst werden (Kapitel 5.2). In der Serienentwicklung und Konstruktion soll mittels der Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten die montagegerechte Produktgestaltung gefördert werden (Kapitel 5.3). Die geometrische Absicherung wird mit der softwaregestützten Baubarkeitsprüfung beschleunigt und durch den verringerten Aufwand zur Aufbereitung der Entscheidungsgrundlage können Montageplaner sich auf die Entwicklung von Lösungen für Baubarkeitskonflikte fokussieren (Kapitel 5.4). Auslöser für einen Planungsfall können die drei Stellhebel Produkt-, Prozess- und Betriebsmitteländerung nach MÜLLER ET AL. sein [MÜLL15].

Bei jeder Produktänderung in der Vorentwicklungsphase, die mindestens eines der vorausgewählten kritischen Betriebsmittel (Kapitel 5.2.1) betrifft, muss der zugehörige Rekonfigurationsraum neu definiert werden (Kapitel 5.2.2). Durch die entwickelten Methoden wird sichergestellt, dass die Definition der Rekonfigurationsräume nur mit gerade hinreichender Detailtiefe erfolgt. Es werden nur kritische Stationen betrachtet, sodass der Aufwand minimiert, zeitgleich der Nutzen aber maximiert wird.

Eine Produktänderung in der Serienentwicklung oder aufgrund einer iterativen Produktoptimierung aktiviert zunächst den Basisbaustein zur automatisierten Bauzustandserzeugung (Kapitel 5.1.3). Der Bauzustand eines Produktes wird sowohl für den quantitativen Abgleich in der geometrischen Absicherung als auch für den qualitativen Abgleich im Rahmen der proaktiven Produktbeeinflussung in der Serienentwicklung und Konstruktion verwendet.

Für die geometrische Absicherung werden mit dem Lösungsbaustein im Kapitel 5.4.2 die Produkthanforderungen automatisiert aus dem Bauzustandsmodell erfasst. Sie dienen als Eingangsgröße für die softwaregestützte Baubarkeitsprüfung (Kapitel 5.4.3), in der der quantitative Abgleich der Produkthanforderungen mit den Betriebsmittelfähigkeiten erfolgt.

Eine Betriebsmitteländerung erfordert immer eine Prüfung der Einordnung des Betriebsmittels in die Klassifizierung. Wie der Name des Bausteins zur Prozess- und Betriebsmittelklassifizierung (Kapitel 5.1.1) impliziert, erfolgt die Klassifizierung des Betriebsmittels nach dem durchzuführenden Prozess sowie der anlagentechnischen Umsetzung des Betriebsmittels. Abhängig von der Klassifizierung können die Visualisierungsmodelle der Betriebsmittelfähigkeiten (Kapitel 5.3.1) aufgebaut werden. Bei der Visualisierung findet das Regelwerk für die Visualisierung (Kapitel 5.3.2) Anwendung. Andererseits können mit dem Lösungsbaustein zur Erfassung der Betriebsmittelfähigkeiten (Kapitel 5.4.1) auf Basis der Klassifizierung die CAD-Modelle der Betriebsmittel und deren Fähigkeiten erfasst werden. Sie werden anschließend in der softwaregestützten Baubarkeitsprüfung mit den automatisch ermittelten Produkthanforderungen (Kapitel 5.4.2) in einem dreistufigen Abgleich auf Kompatibilität untersucht (Kapitel 5.4.3). Darüber hinaus muss nach jeder Betriebsmitteländerung die Vorauswahl der kritischen Betriebsmittel (Kapitel 5.2.1) für die Vorentwicklungsphase überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Das Ergebnis aus der softwaregestützten Baubarkeitsprüfung wird gemäß Anforderung D4 grafisch aufbereitet und dient als Entscheidungsunterstützung (Kapitel 5.4.4) für einen der Stellhebel nach MÜLLER ET AL..

Der Stellhebel der Prozessänderung (z. B. Linienbelegungsänderung) erfordert eine Anpassung im Datenmodell und beeinflusst die Lösungsbausteine. Das Datenmodell (Kapitel 5.1.2) dient darüber hinaus als Basisbaustein in jeder Phase durchgängig als Ablageort für sämtliche generierte Daten. Nach einer Prozessänderung wird zudem eine Neuberechnung der Bauzustände erforderlich, da die Montagevorrangfolge zwischen verschiedenen Montagelinien voneinander abweichen kann.

Das Produkt ändert sich deutlich häufiger als die Betriebsmittel. Deshalb haben auf Seiten des Produktes hochautomatisierte Lösungen einen besonders großen Effekt. Auf Seiten des Betriebsmittels ist ein deutlich geringerer Automatisierungsgrad der Bausteine akzeptabel. Da eine Produktänderung auch dazu führen kann, dass keine montagerelevanten Merkmale und damit keine Anforderungen angepasst werden, ist bei dem Abgleichsmodul (Kapitel 5.4.3) ein mittlerer Automatisierungsgrad anzustreben.

5 Methodik zur Softwareunterstützung in der proaktiven Produktgestaltung und geometrischen Absicherung

Methodology of Software Support in Proactive Product Design and Geometric Validation

In diesem Kapitel werden die Bausteine der Methodik im Detail beschrieben. Hierzu werden zunächst die Basisbausteine erläutert (Kapitel 5.1). Daraufhin wird der Aufbau der Lösungsbausteine je in einem Kapitel beschrieben. In Kapitel 5.5 wird die gesamte Methodik sowie der Datenfluss zwischen den Bausteinen zusammengefasst.

5.1 A) Basismethoden und -modelle

Basic Methods and Models

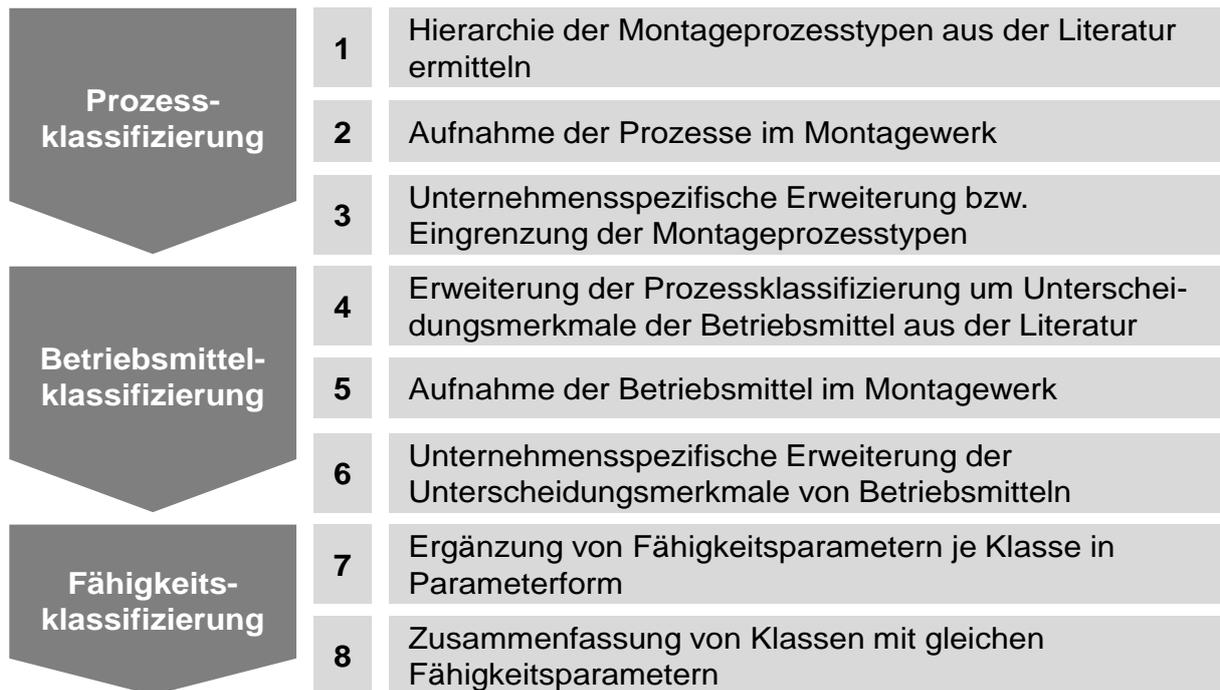
Als erster Basisbaustein wird in Kapitel 5.1.1 eine Methode zur Klassifizierung der Prozesse und Betriebsmittel erläutert. Diese wird zusammen mit anderen Metadaten in einem Datenmodell abgebildet (Kapitel 5.1.2). In Kapitel 5.1.3 wird beschrieben, wie der Bauzustand von Produkten automatisch erzeugt werden kann.

5.1.1 Prozess- und Betriebsmittel-Klassifizierung

Process and Resource Classification

Die Methode zur Klassifizierung der Montageprozesse und Betriebsmittel orientiert sich an BACKHAUS ET AL. [BACK17].

Neben den zwei grundlegenden Schritten der Klassifizierung der Montageprozesse und der Betriebsmittel wird als dritte Ebene die Fähigkeitsklassifizierung ergänzt (Bild 5.1).

**Bild 5.1:** Methode zur Prozessklassifizierung*Method of Process Classification*

Für die Prozessklassifizierung müssen zunächst auf Basis der Literatur und Normen die unterschiedlichen Montageprozessstypen ermittelt und in eine grundlegende Prozesshierarchie gebracht werden. Bild 5.2 zeigt eine breite Übersicht der Prozessstypen in der Montage. Grundlegende Basis dafür ist in dieser Arbeit das Modell von MÜLLER [MÜLL13a]. Dieses wird anhand verschiedener Normen und wissenschaftlicher Artikel erweitert [DIN74; VDI90; DIN03; LOTT12; HAMM17] und kann als Ausgangslage für die weitere unternehmensspezifische Betrachtung dienen. In Bild 5.2 kann die Quelle über die Rahmen der einzelnen Felder unterschieden werden. Durch eine Prozessaufnahme im Montagewerk kann diese Hierarchie unternehmensspezifisch erweitert werden. Durch den Ausschluss bestimmter Prozessstypen vom Betrachtungsumfang können für den spezifischen Anwendungsfall irrelevante Prozessstypen von vornherein ignoriert werden, was den Aufwand in den nachfolgenden Schritten erheblich reduzieren kann. Der Vorteil des initialen Aufbaus der Hierarchie der Montageprozessstypen anhand von Literatur und Normen liegt in der klaren Abgrenzung von Begriffen. Eine von Beginn an eindeutige Begriffsdefinition verhindert das andernfalls später erforderliche Aufteilen von Klassen.

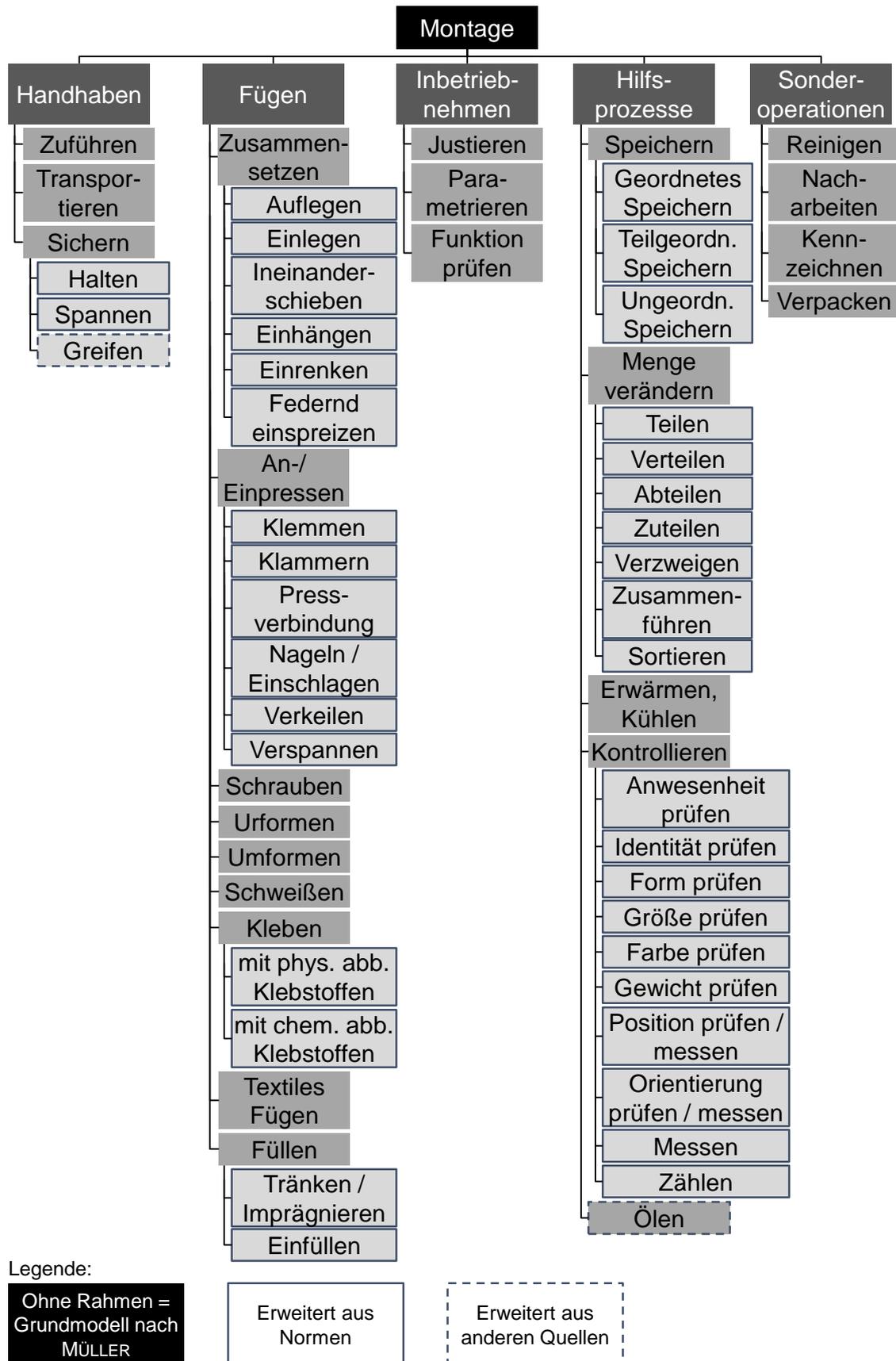


Bild 5.2: Sammlung von Montageprozessstypen

Collection of Assembly Process Types

Analog wird für die Klassifizierung der Betriebsmittel vorgegangen. Ergeben sich hier sehr anwendungsspezifische Klassen, kann für die Benennung der Klassen beispielsweise auf die Bezeichnung der Anlagenhersteller in Produktkatalogen zurückgegriffen werden. Anschließend liegt eine anwendungs- und unternehmensspezifische Klassifizierung der Betriebsmittel vor. Für den Montageprozessstypen *Schrauben* ist in Bild 5.3 ein Ausschnitt aus der Betriebsmittelklassifizierung gezeigt. Die Kombination der Ausprägungen über alle Ebenen der Klassifizierungshierarchie ergibt die Endeffektorklasse. Eine beispielhafte Endeffektorklasse ist im rechten Teil der Abbildung aufgelistet.

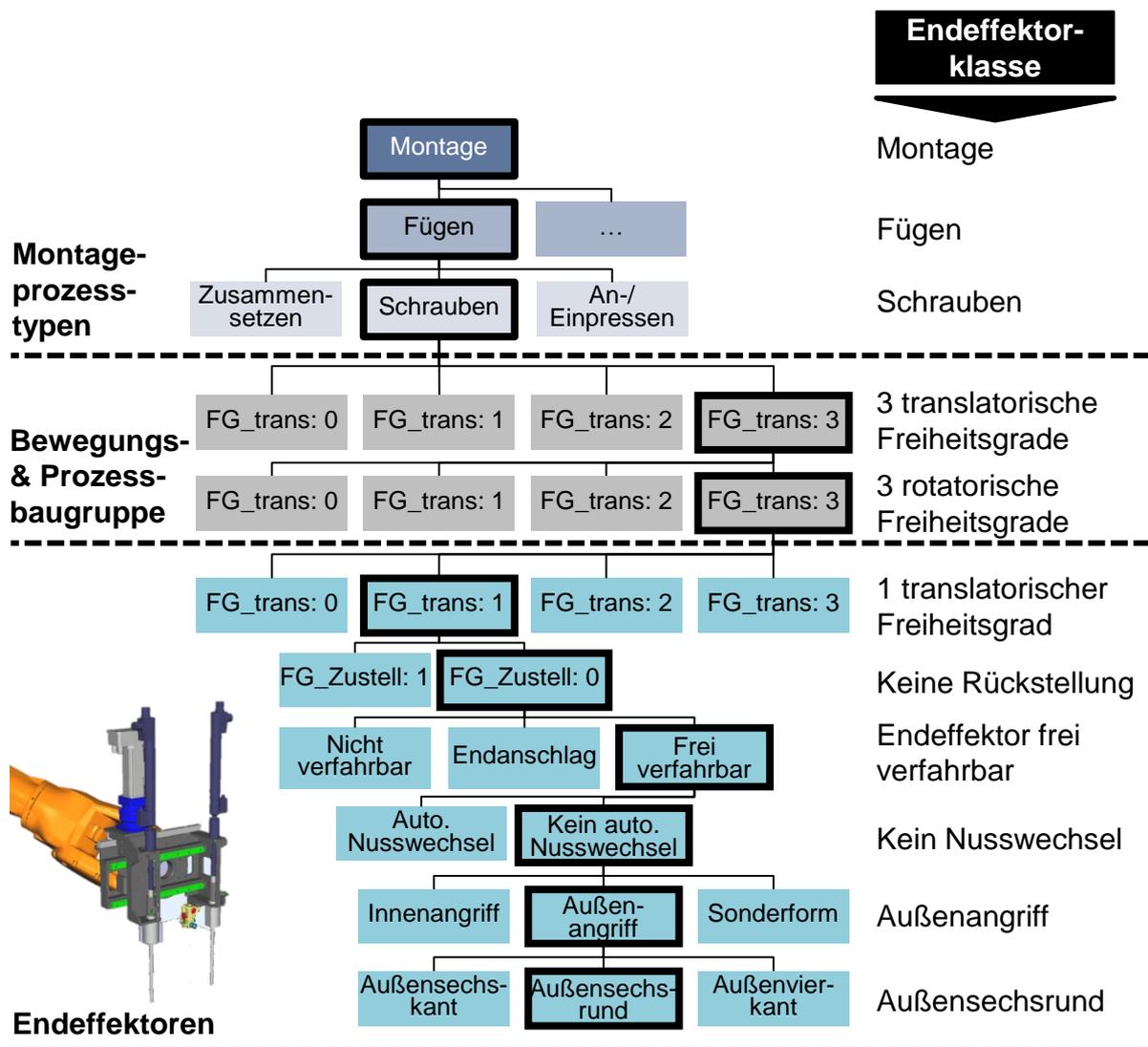


Bild 5.3: Beispielhafte Betriebsmittelklassifizierung für den Prozessstyp Schrauben

Exemplary Classification of Resources for the Process Type Tightening

Zu jeder Endeffektorklasse werden die beschreibenden Fähigkeitsparameter hinterlegt. Hier empfiehlt es sich die baubarkeitsrelevanten Fähigkeitsparameter in einem Workshop mit allen betroffenen Parteien (z. B. Bauteilentwickler, Montageplaner) zu ermitteln, sodass keine einseitige Sichtweise entsteht.

Ergeben sich zwei Klassen mit den gleichen Fähigkeitsparametern, können diese beiden Klassen zusammengefasst werden. Da so die Anzahl unterschiedlicher Betriebsmitteltypen eingeschränkt wird, wird der Beschreibungsaufwand reduziert. Hierbei werden zwei Rationalisierungsregeln angewendet:

- 1.) Gibt es auf einer Ebene Unterscheidungsmerkmale, die keine Unterscheidung der Fähigkeiten bewirken, können diese zusammengefasst werden.
- 2.) Können alle Klassen einer Ebene mit den gleichen Fähigkeiten beschrieben werden, kann die gesamte Hierarchieebene entfernt werden.

Zu Beginn der Zusammenfassung der Klassen empfiehlt sich lediglich die Befolgung der Regel 1.), da so vorhandene Unterscheidungsmerkmale nicht komplett gestrichen werden, falls diese später benötigt werden. Mit zunehmender Beschreibungserfahrung entwickelt der Anwender eine Routine und kann Regel 2.) anwenden. Redundanzen oder fehlerhaftes Herausstreichen von Klassen können durch Erfahrung vermieden werden. Es hat sich als praktikabel erwiesen, die Klassifizierung durch eine einzelne Person oder durch ein durchgängig dafür verantwortliches Team erstellen zu lassen.

Als Handlungsbedarf wird in Kapitel 3.5.1 festgestellt, dass die Modelle zur Betriebsmittelklassifizierung bewegungsorientiert eingeteilt werden sollen, um sie für die Baubarkeitsprüfung vorzubereiten. Dies betrifft die Schritte 4-6 in Bild 5.1. Die modularisierte Betriebsmittelhierarchie nach MÜLLER zielt auf die Entwicklung und Rekonfiguration von Betriebsmitteln ab [MÜLL18a]. Bis zur Ebene des Stationsmoduls, welches im Weiteren als Betriebsmittel bezeichnet wird, entspricht die Einteilung einer bewegungsorientierten Einteilung. In dieser Arbeit ist lediglich das Prozessmodul relevant. Dieses wird im Weiteren bewegungsorientiert in Baugruppen eingeteilt (Bild 5.4). Das Prozessmodul beinhaltet zunächst eine Bewegungsbaugruppe. Diese definiert die Freiheitsgrade der Prozessbaugruppe. Die Prozessbaugruppe ist für die Durchführung des Montageprozesses zuständig. Sie kann weiter eingeteilt werden in einzelne Endeffektoren, die die bauteilberührenden Elemente sind. Die Unterscheidungsmerkmale der Betriebsmittel müssen in dem Klassifizierungsmodell den unterschiedlichen Baugruppentypen zugewiesen werden. Dadurch wird der Pflegeaufwand für den Austausch einzelner Baugruppen bei Rekonfigurationen minimiert. Wird beispielsweise statt einer Linearachse ein Knickarmroboter eingesetzt, muss lediglich die Bewegungsbaugruppe ausgetauscht und neu beschrieben werden. Die Beschreibung der Prozessbaugruppe und der Endeffektoren können ohne Änderung übernommen werden. Bei komplizierten Anlagenaufbauten aus dem Sondermaschinenbau kann es erforderlich sein, mehr als drei Bewegungsebenen einzuführen. Hierfür können mehrere Hierarchieebenen der Prozessbaugruppe verwendet werden. Entscheidend ist, dass jeder Endeffektor immer eindeutig trennbar ist und nicht weiter unterteilt werden kann.

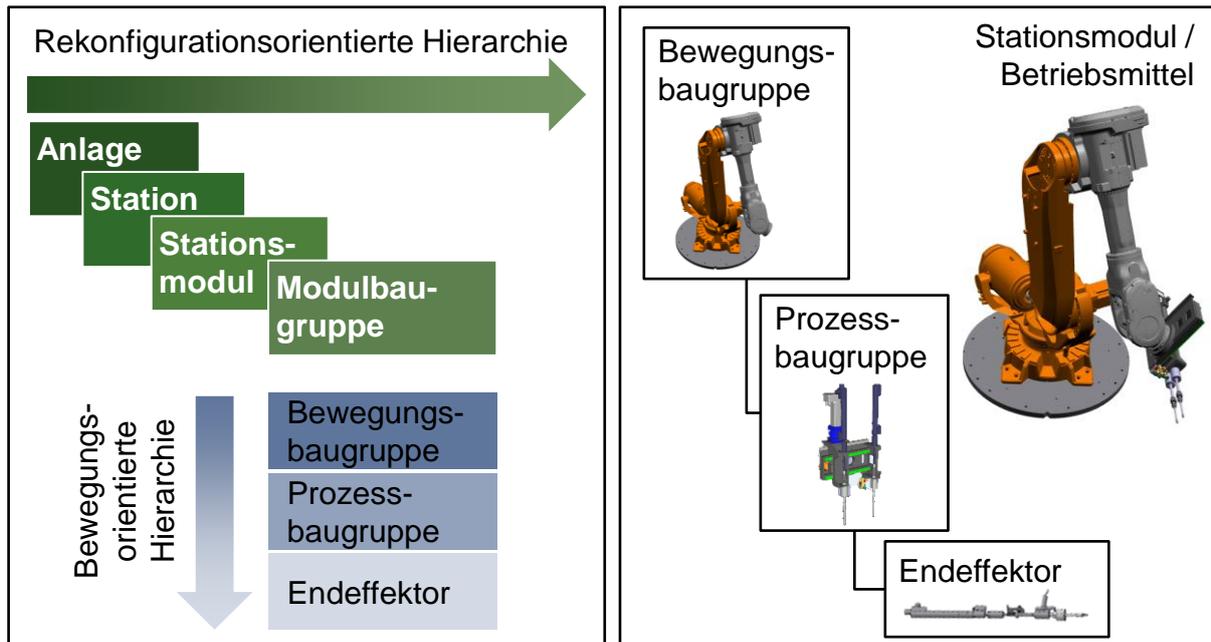


Bild 5.4: Bewegungsorientierte Betriebsmitteleinteilung

Movement-Oriented Structuring of Resources

Ist das verkürzte Modell aufgebaut, müssen bei einer Änderung oder Erweiterung nicht erneut alle Schritte aus Bild 5.1 durchlaufen werden. Wird ein Betriebsmittel umgebaut, muss zunächst geprüft werden, ob schon eine passende Klasse vorhanden ist. Ist das der Fall, kann das Betriebsmittel mit den hinterlegten Fähigkeitsparametern beschrieben werden. Ist keine passende Klasse vorhanden, muss der Klassifizierungsbaum von oben so weit durchlaufen werden, bis in einer Ebene keine zutreffenden Klassifizierungsmerkmale auffindbar sind. Es kann nun entweder in der gleichen Ebene ein ergänzendes Unterscheidungsmerkmal eingefügt werden, oder es muss darüber eine neue Ebene eingezogen werden, in der mindestens zwei Unterscheidungsmerkmale vorliegen – je eines für die vorhandenen Klassen und eines für die neue Klasse. Bei zuvor unsauberer Trennung der Begriffe kann es auch erforderlich werden, eine Klasse in neue Klassen aufzuteilen. Anschließend ist zu prüfen, ob die darunter liegenden Merkmale übernommen werden können, oder ob neue Unterscheidungsmerkmale und Fähigkeitsparameter verwendet werden müssen. Sind alle Fähigkeitsparameter für die neue Klasse beschrieben, ist noch einmal zu prüfen, ob es tatsächlich keine andere Klasse gibt, bei der die gleichen Fähigkeitsparameter verwendet werden.

5.1.2 Datenmodell

Data Model

Bei der Erstellung des Datenmodells wird auf dem Modell von MÜLLER ET AL. aufgebaut (Kapitel 3.1.3), weil dieses die Zusammenhänge der Metadaten sehr realistisch abbildet und für einen ähnlichen Anwendungsfall entwickelt wurde [MÜLL15]. Das Ergebnis ist in Bild 5.5 abgebildet.

Zunächst wird bei MÜLLER ET AL. nur die Entität Station beschrieben. Diese muss für eine detaillierte Analyse der Baubarkeit weiter in die einzelnen Betriebsmittel unterteilt werden. Der Begriff des Betriebsmittels entspricht dem Stationsmodul in Bild 5.4. Die Betriebsmittel müssen weiterhin wie in Kapitel 5.1.2 in die unterschiedlichen Baugruppen eingeteilt werden können. Deshalb werden die Entitäten Bewegungsbaugruppe, Prozessbaugruppe und Endeffektor in das Datenmodell eingefügt, die jeweils mit einer 1:n-Beziehung verbunden sind. Da es bei komplizierten Betriebsmittelaufbauten mehrere Prozessbaugruppen geben kann, wird bei der Prozessbaugruppe das Attribut Parent_ID eingefügt, sodass eine Prozessbaugruppe einer anderen Prozessbaugruppe untergeordnet werden kann. Die Durchführung eines Prozesses kann eindeutig einem Betriebsmittel zugewiesen werden, weshalb der Bauteilart-Prozess (bei MÜLLER ET AL. „Prozess“ [MÜLL15]) mit dem Betriebsmittel statt wie bei MÜLLER ET AL. mit der Station verknüpft wird.

Zweitens wird der Prozesstyp bei MÜLLER ET AL. weiter untergliedert in die Montageprozessstypen sowie die Endeffektorklasse. In diesen Entitäten wird jeweils das Attribut Parent_ID eingefügt, mit dem es ermöglicht wird die Hierarchie der Montageprozessstypen sowie die Betriebsmittelklassifizierung (vgl. Kapitel 5.1.1) abzubilden. Die Betriebsmittelklassifizierung wird wiederum mit der Prozessbaugruppe verbunden und kann an die Endeffektoren vererbt werden, sodass für jeden Endeffektor die passende Endeffektorklasse verfügbar ist. Dadurch wird die Zuweisung der zugehörigen Parametergruppe als Fähigkeitsschablone zur jeweiligen Betriebsmittelbaugruppe und als Anforderungsschablone zur jeweiligen Bauteilvariante ermöglicht. Diese Entitäten entsprechen bei MÜLLER ET AL. den Entitäten der Anforderung und Fähigkeit. Hier werden jedoch nicht nur einzelne Anforderungen mit einzelnen Fähigkeiten verglichen, sondern eine Gruppe von Anforderungen wird mit einer Gruppe von Fähigkeiten verglichen, sodass ein komplexerer Abgleich zusammenhängender Parameter ermöglicht wird. Der Parametergruppe werden die einzelnen Parameter hinzugefügt. Zudem kann angegeben werden, wie diese miteinander in Beziehung stehen. Jedem Parameter kann zudem zugewiesen werden, bei welchem Prüfverfahren er verwendet bzw. geprüft wird. Dies ermöglicht die Unterscheidung zwischen simulativer Prüfung und Prüfung durch Abgleich von Parametern. Ein Parameter kann für beide Prüfverfahren verwendet werden. Deshalb besteht hier eine n:m-Beziehung.

In der Domäne Produkt wird die Tabelle Schlüsselwort-Bewertung ergänzt. Details zu ihrer Verwendung sind in Kapitel 5.1.3 beschrieben. Die restlichen Erweiterungen sind nicht im Entity-Relationship-Modell erkennbar. Bei jeder Baugruppen- und der Betriebsmittel-Entität werden Attribute hinterlegt, mit denen das CAD-Modell verknüpft werden kann. Es wird auf eine Ablage der CAD-Modelle in dieser Datenbank verzichtet, da PDM-Systeme hierzu geeigneter sind. Es muss jedoch ein PDM-System gewählt werden, das in der Lage ist, Simulationsmodelle abzuspeichern. CAD-Produktmodelle werden ebenfalls aus den PDM-Systemen bezogen.

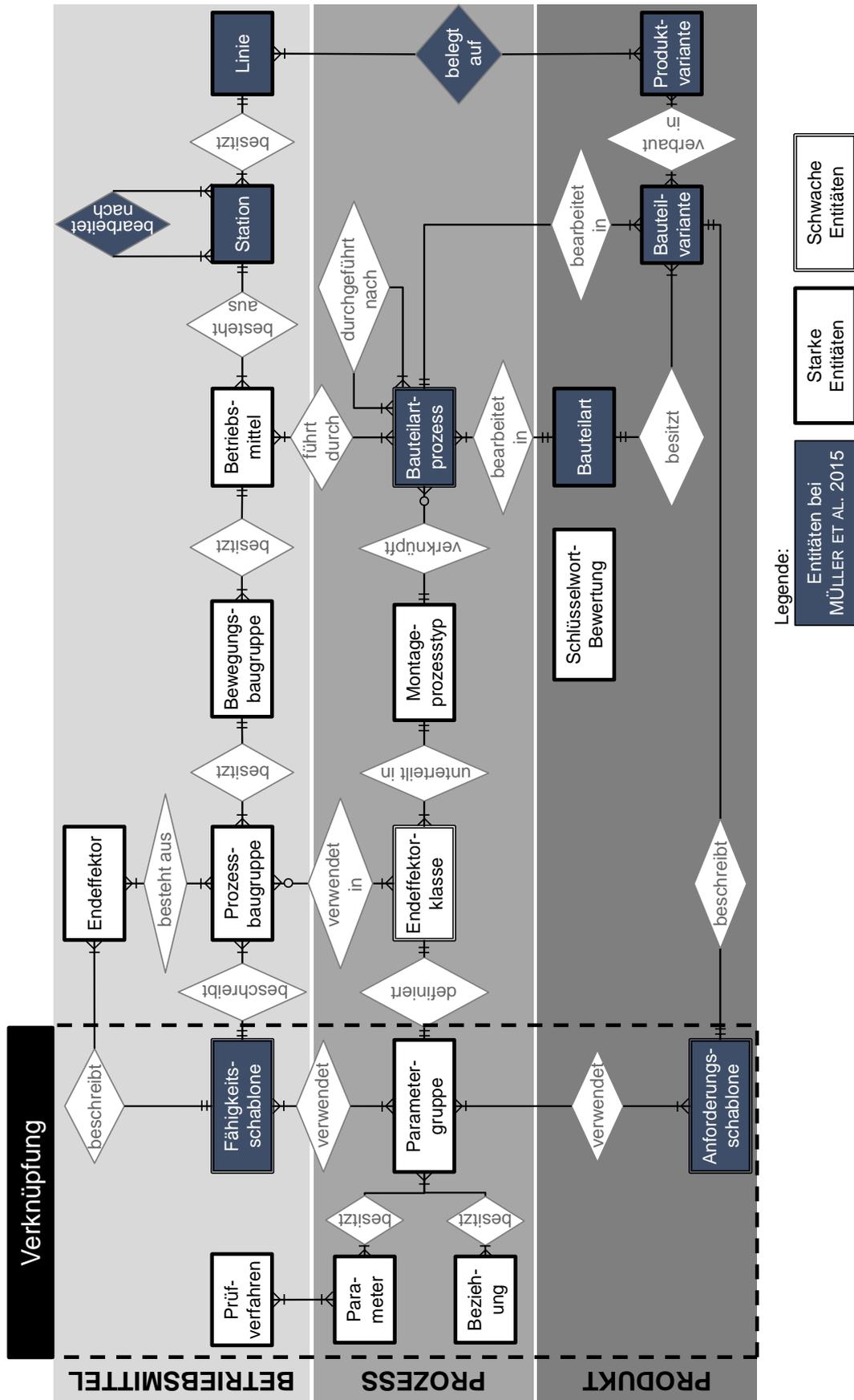


Bild 5.5: Datenmodell für die Methoden zur Softwareunterstützung

Data Model for the Method for Software-Support

Fünftens werden alle Tabellen aus den Partialmodellen Produkt und Betriebsmittel, die nicht in dem Abschnitt Verknüpfung in Bild 5.5 eingetragen sind, und die Entität Bauteilart-Prozess aus der Prozessdomäne um ein Attribut Szenario ergänzt. Dadurch wird es wie bei MICHNIEWICZ ET AL. ermöglicht unterschiedliche Planungsfälle abzubilden [MICH17]. Es muss immer mindestens ein Basisszenario eingetragen werden, das den aktuellen Stand der Montage abbildet.

5.1.3 Automatisierte Bauzustandserzeugung

Automated Creation of the Assembly State

In Bild 5.6 ist der Algorithmus für die automatische Bauzustandserzeugung dargestellt. Zunächst ist CAD-Produktmodell (A) in einem aktiven CAD-Fenster zu öffnen. Daraufhin kann das Bauzustandsprogramm (B) gestartet werden. Darin wird der Bauteilart-Prozess gewählt, für den der Bauzustand des gewählten Produktes erstellt werden soll. Zusätzlich muss die Montagelinie gewählt werden. (B1)

Aus dem Datenmodell kann eine exakte Vorrangfolge je Montagelinie ermittelt werden (B2). Der gewählte Bauteilart-Prozess gilt als Trenner für diese Vorrangfolge. Alle Prozessschritte, die vor dem gewählten Bauteilart-Prozess liegen, werden in einer Liste aufgeführt. Alle Prozessschritte, die nach dem gewählten Bauteilart-Prozess liegen, werden in einer weiteren Liste gespeichert. Damit ist die Vorbereitung der Metadaten abgeschlossen.

Nun kann der CAD-Strukturbaum des Produktmodells aus dem CAD-Programm ausgelesen werden (A1). Jedes Bauteil aus dem Strukturbaum (A2) wird nun in den vorbereiteten Listen gesucht (A3). Befindet es sich in der ersten Liste wird es eingeblendet, weil es folglich schon verbaut ist, wenn der gewählte Bauteilart-Prozess durchgeführt wird. Befindet es sich in der zweiten Liste, ist es noch nicht verbaut, wenn der gewählte Bauteilart-Prozess durchgeführt wird, und es muss ausgeblendet werden.

Dieser Schritt wird für jedes Bauteil aus dem CAD-Strukturbaum wiederholt, sodass letztlich ein korrekter Bauzustand für den gewählten Prozessschritt angezeigt wird. Parallel wird für jedes Bauteil der Prozessschritt in eine Liste mit der produktspezifischen Montagefolge geschrieben.

Die Logik zum Finden eines Bauteils aus dem CAD-Modell in einer der ausgeleiteten Listen aus der Datenbank erfordert eine datentechnische Verknüpfung (C). Erster Anhaltspunkt für die eindeutige Identifikation einer Bauteilvariante in Unternehmen ist üblicherweise die Sachnummer. In CAD-Modellen ist die Sachnummer in aller Regel mit abgebildet und dem Bauteilvariantenmodell zugewiesen. Ist das der Fall kann eine eindeutige Zuweisung direkt und vollautomatisch erfolgen. Dafür muss zuvor die Sachnummer eindeutig einem Montageprozess zugewiesen worden sein. Dies erfolgt in der unternehmerischen Praxis gezwungenermaßen vor Beginn der Produktion, da darüber die Information verfügbar ist, wohin in der internen Logistik die Bauteile geliefert werden müssen.

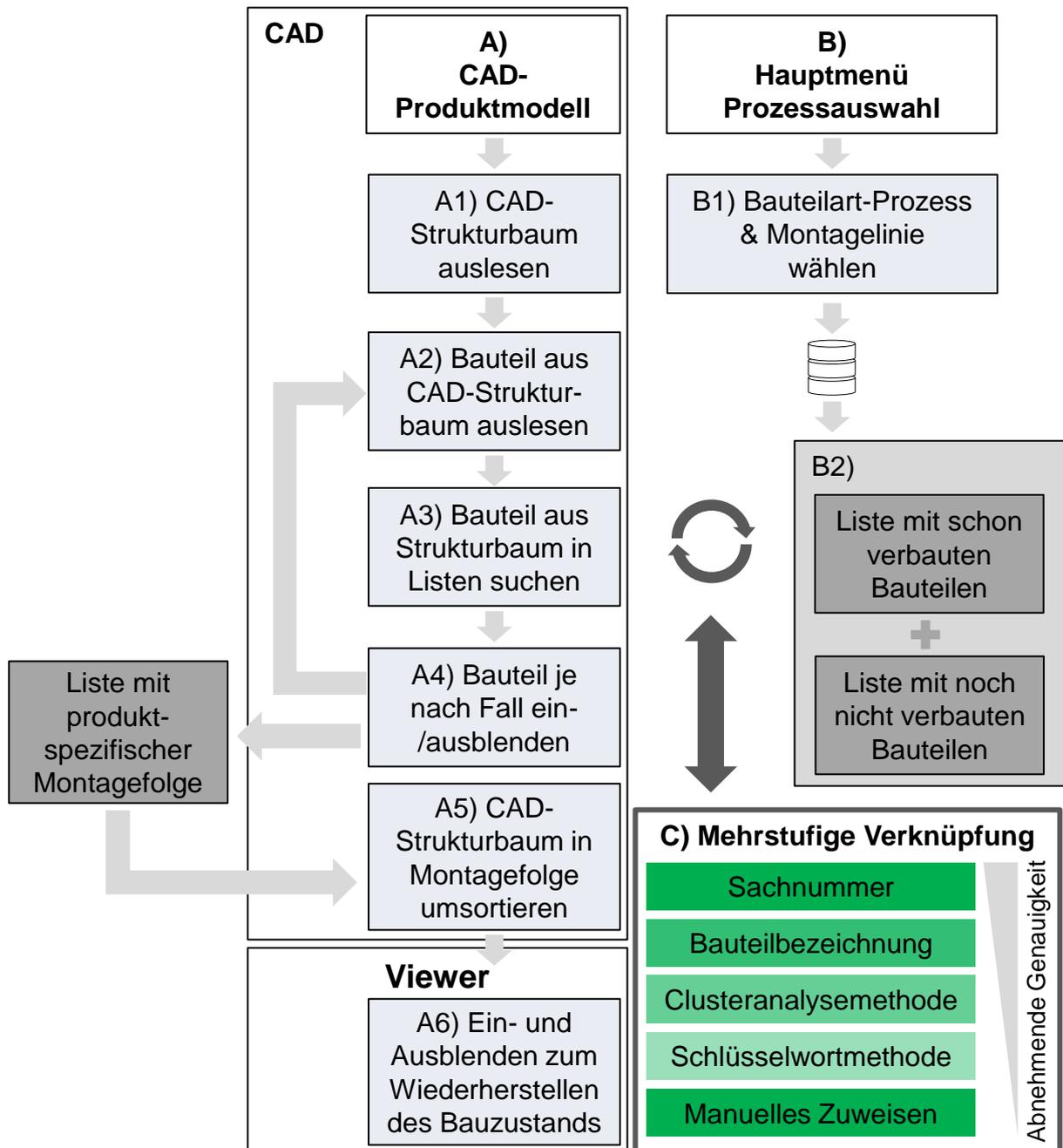


Bild 5.6: Ablaufplan für die automatisierte Bauzustandserzeugung

Flowchart for the Automated Generation of the Assembly State

Im Laufe der Produktentwicklung kann es jedoch dazu kommen, dass eine Bauteilsachnummer noch nicht dem Verbauprozess zugewiesen wurde. Für diese Forschungslücke wurde in Kapitel 3.5.1 der Handlungsbedarf ermittelt, dass ein Bauzustandsmodell auch ohne direkte Sachnummernzuweisung zum Prozess möglich sein muss. Deshalb wird im Folgenden ein mehrstufiges Konzept zur Verknüpfung von Daten vorgestellt, wenn kein Primärschlüssel vorhanden ist. In Bild 5.7 ist dies am Beispiel der Baugruppe Verdichtung eines Verbrennungsmotors gezeigt.

Mit abnehmender Genauigkeit und Sicherheit der korrekten Zuweisung wird nach der Sachnummer zunächst die Bezeichnung als Schlüssel angewendet, mittels der Clusteranalyse der Lösungsraum erweitert und zuletzt mit einer eigens entwickelten Schlüsselwortmethode ein Wahrscheinlichkeitswert für die korrekte Zuweisung ermittelt. Erst wenn mit diesen Methoden keine Lösung gefunden werden kann, wird dem Nutzer die Möglichkeit zur manuellen Zuweisung angeboten. Die Methoden werden im Folgenden einzeln erläutert.

Bei der Bezeichnungssuche wird statt der Sachnummer die exakte Bezeichnung des Bauteils aus dem Strukturbaum des CAD-Modells in der Datenbankausleitung gesucht. Die Güte dieser Suchmethode ist stark abhängig von der Benennung der Bauteildateien. Werden standardisierte Bezeichnungen verwendet, ist diese Methode ähnlich genau wie die Sachnummernsuche. Insbesondere bei vielen Personalwechseln in der Bauteilkonstruktion oder Vergabe unterschiedlicher Bauteilvarianten einer Bauteilart an unterschiedliche Zulieferer ist die Wahrscheinlichkeit deutlich geringer, dass die exakt gleiche Bezeichnungslogik von alten Varianten übernommen wird.

Nach der Bezeichnungssuche wird die Clusteranalysemethode verwendet. Es wird angenommen, dass die Bauteilstruktur nach MÜLLER [MÜLL13a] (Kapitel 2.1.1) in Bauteilarten, Stationsmodule und Baugruppen unterteilt ist und dass so das CAD-Modell und die Bauteilstammdaten aus der Datenbank strukturiert sind. Sowohl die Sachnummernsuche als auch die Bauteilbezeichnungssuche werden immer erst in dem engsten Suchraum angewendet. Dieser wird durch die Bauteilart eingegrenzt. Kann die Sachnummer bzw. Bezeichnung aus dem CAD-Modell nicht innerhalb der Bauteilart-Sachnummern aus der Datenbank gefunden werden, kann der Suchraum auf die Baugruppenebene erweitert werden. Kann auch in der gesamten Baugruppenstruktur aus der Datenbank die Sachnummer oder Bezeichnung nicht gefunden werden, wird im kompletten Modul gesucht.

In dem Beispiel in Bild 5.7 wird für die Bauteilvariante mit der Sachnummer 4567894 in den Produktstammdaten innerhalb der Bauteilart Ölrücklaufleitung kein Eintrag mit der gleichen Sachnummer oder der Bezeichnung *Ölrücklauf 3-Zyl* gefunden. Deshalb wird im zweiten Schritt der Lösungsraum auf die komplette Baugruppe erweitert. Innerhalb der Baugruppe Verdichtung kann jedoch anhand der Sachnummer auch kein passender Eintrag gefunden werden. Wird nun innerhalb der Baugruppe Verdichtung nach der Bezeichnung *Ölrücklauf 3-Zyl* gesucht, wird der Eintrag mit der Sachnummer 4567890 gefunden. Dieser wird im Prozess 754 verbaut, sodass die Variante 4567894 aus dem CAD-Modell auch dem Prozess 754 zugewiesen werden kann, obwohl sie in den Produktstammdaten noch nicht einem Montageprozess zugewiesen wurde. Nach der gleichen Prozedur kann die Sachnummer 4567891 über Sachnummernsuche innerhalb der Baugruppe dem Prozess 752 zugewiesen werden. Hier könnte es sich beispielsweise um einen fehlerhaft gepflegten Produktstamm handeln, weil die gleiche Sachnummer in dem CAD-Strukturbaum einer anderen Bauteilart zugewiesen wurde.

Bei dem Beispiel in Bild 5.7 kann für die Bauteilvariante mit der Sachnummer 9999000 weder über die Sachnummernsuche noch über die Bezeichnungssuche innerhalb der verschiedenen Clusterebenen eine Prozesszuweisung erfolgen. Für diesen Fall wird im Folgenden die Schlüsselwortmethode entwickelt.

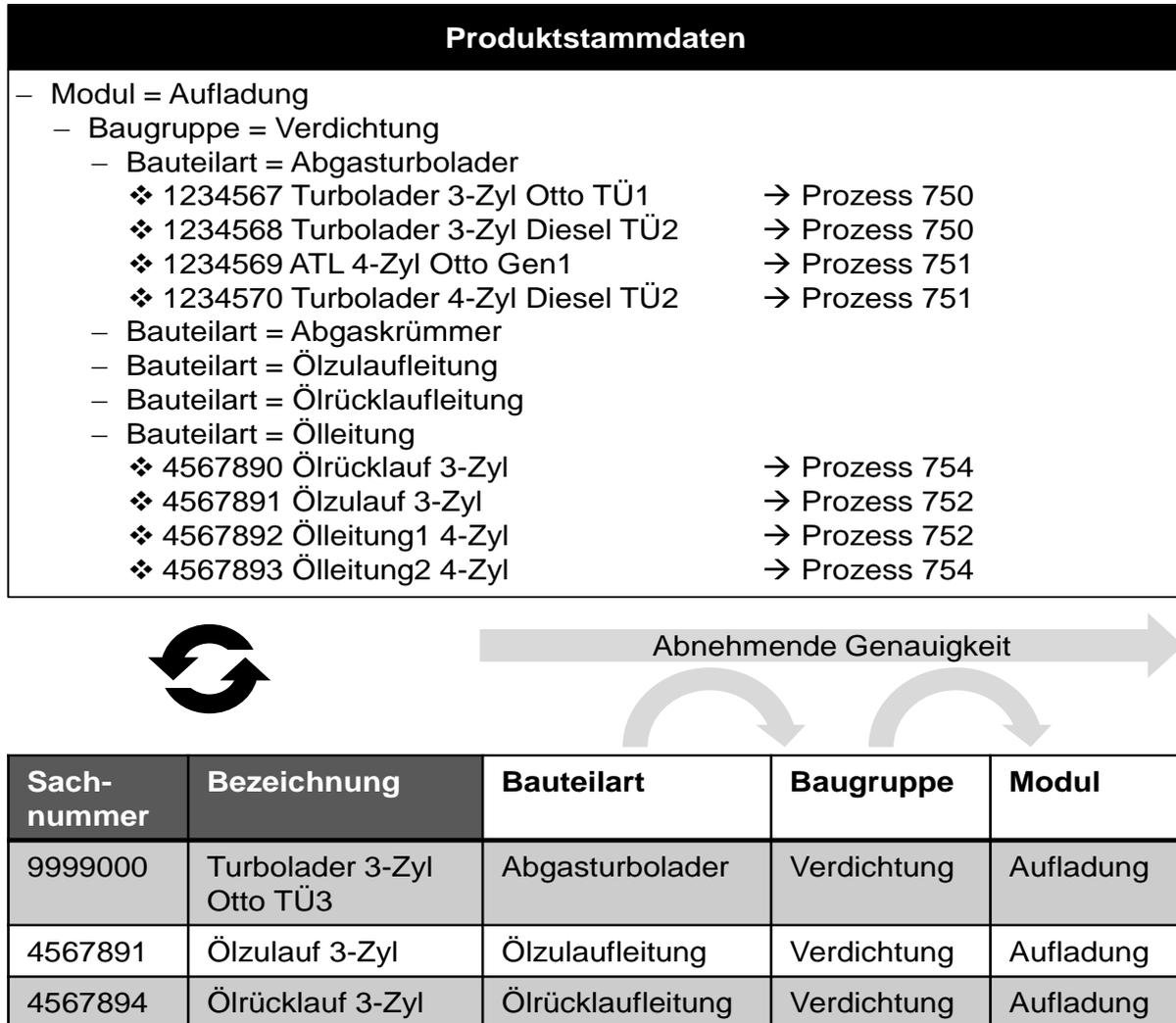


Bild 5.7: Schlüsselwortmethode

Method of Key Words

Bei initialem Einlesen der bereits im Produktstamm vorhandenen Bauteilvarianten wird die Bezeichnung jeder Bauteilvariante in ihre einzelnen Bausteine zerlegt. Aus der Bezeichnung *Turbolader 3-Zyl Otto TÛ1* werden somit die Begriffe *Turbolader*, *3-Zyl*, *Otto* und *TÛ1* extrahiert und in die gesonderte Tabelle Schlüsselwort-Bewertung in der Datenbank geschrieben. Wird anschließend die Bezeichnung *Turbolader 3-Zyl Otto TÛ2* eingelesen, werden hier die Einzelbegriffe *Turbolader*, *3-Zyl*, *Otto* und *TÛ2* extrahiert. Die ersten 3 Begriffe sind bereits in der Datenbank vorhanden, weshalb nun lediglich der Begriff *TÛ2* in der Tabelle Schlüsselwort-Bewertung eingetragen wird. Dieses Vorgehen wird für alle Einträge im Produktstamm wiederholt. Jedem dieser Begriffe wird zunächst in der Spalte Bewertung der Tabelle Schlüsselwort-Bewertung der Wert *unbewertet* zugewiesen.

Ein Administrator mit Montageprozessverständnis muss in regelmäßigen Abständen die unbewerteten Begriffe bewerten. Dafür werden vier Bewertungsstufen definiert. Wird als Bewertung für einen Begriff der Wert 0 in die Datenbank eingetragen, bedeutet dies, dass der Begriff keine Aussage über die Zuordnung zu einer Bauteilart und damit keine Prozesszuweisung erlaubt. Je höher die Bewertungszahl ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass eine Bauteilvariante, deren Bezeichnung den Begriff beinhaltet, im gleichen Prozessschritt verbaut wird.

Die Begriffe *TÜ1* und *TÜ2* stehen in dem Beispiel aus Bild 5.7 für die technische Überarbeitung, also Produktgeneration, und erhalten den Wert 0, weil sie keinen Einfluss auf den Verbauschnitt haben. Da die Unterscheidung nach Otto- und Diesel-Abgasturboladern im Beispiel keine Auswirkung auf den Verbauschnitt hat, wird auch dem Begriff *Otto* der Wert 0 zugewiesen. Im Beispiel in Bild 5.7 ist ersichtlich, dass die 4-Zylinder-Varianten des Abgasturboladers im Prozessschritt 751 verbaut werden, während die 3-Zylinder-Varianten im Prozessschritt 750 verbaut werden. Andererseits trifft für den Begriff *3-Zyl* auch zu, dass er bei anderen Bauteilarten verwendet werden könnte. Der Begriff *3-Zyl* bekommt deshalb die Bewertung 1 in der Datenbank. Die Abkürzung *ATL* bei der Sachnummer 1234569 würde beispielsweise den Wert 2 erhalten, da sie zwar eine klar sprechende Abkürzung darstellt, allerdings das Risiko bei Abkürzungen besteht, dass sie auch für andere Informationen verwendet werden können. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung der Abkürzung *ZK* für *Zylinderkopf* und *Zündkerze*. Solange innerhalb der Bauteilart gesucht wird, ist dies unproblematisch. Wird jedoch innerhalb der Baugruppe Zylinderkopf gesucht, kann sowohl bei der Zündkerze als auch bei dem Zylinderkopf eine Prozesszuweisung gefunden werden. Der Begriff Turbolader erlaubt eine eindeutige Zuweisung zur korrekten Bauteilart und wird deshalb mit 3 bewertet. Anhand eines Anwendungsbeispiels bei der BMW Group konnte gezeigt werden, dass die Anzahl der Schlüsselwörter konvergiert (vgl. Kapitel 6.2). Mit neuen Produktgenerationen kommen immer weniger neue Begriffe hinzu, die zu bewerten sind. Wenn eine vierstufige Bewertungslogik im betroffenen Anwendungsfall nicht ausreicht, kann auch eine detailliertere Unterscheidung gewählt werden.

Nachdem die Schlüsselwörter bewertet wurden, kann die Anwendung der Schlüsselwortmethode erfolgen. Da bei der Bauteilvariante mit der Sachnummer 9999000 keine Prozesszuweisung über die Sachnummer oder Bezeichnung erfolgen konnte, wird im nächsten Schritt die Bezeichnung in ihre Bausteine zerlegt. Die einzelnen Begriffe *Turbolader*, *3-Zyl*, *Otto* und *TÜ3* werden zunächst innerhalb der Bezeichnung des ersten Datenbankeintrags mit der Sachnummer 1234567 gesucht. Alle Begriffe außer *TÜ3* tauchen auch in der anderen Bezeichnung in der Datenbank auf. Deshalb wird der Begriff *TÜ3* mit 0 bewertet. Die restlichen Begriffe werden mit den Werten aus der Schlüsselwort-Bewertung gewichtet. Der Begriff *Turbolader* erhält den Wert 3, der Begriff *3-Zyl* erhält den Wert 1, der Begriff *Otto* erhält den Wert 0. Die Summe der Werte ergibt 4 und wird dem Prozessschritt 750 zugewiesen. Auch aus dem Vergleich mit der Sachnummer 1234568 ergibt sich der Wert 4 für den Prozessschritt 750. Aus dem

Vergleich mit der Sachnummer 1234569 ergibt sich lediglich der Wert 0 für den Prozessschritt 751, da nur der Begriff *Otto* in beiden Bezeichnungen auftaucht, dieser aber die Bewertung 0 erhält. Bei Abgleich mit der Bezeichnung der Sachnummer 1234570 ergibt sich für den Begriff *Turbolader* der Wert 3. Die restlichen Begriffe erhalten den Wert 0. Somit erhält der Prozessschritt 751 dadurch den Wert 3. Es wird nun je Prozessschritt der höchste Wert ermittelt. Der Prozessschritt mit der höchsten Bewertung wird dem Bauteil aus dem CAD-Strukturbaum zugewiesen. Dies ist in dem Fall der Sachnummer 9999000 der Prozessschritt 750 mit dem Wahrscheinlichkeitswert 4 für eine korrekte Zuweisung.

Lässt sich auch über die Schlüsselwortmethode keine Station zuweisen, kann eine Zuweisung über die Bauteilart erfolgen. Ist auch das nicht erfolgreich, wird das Element aus dem CAD-Strukturbaum als nicht zuordenbar markiert. Es kann über manuelles Zuweisen eines Verbauschrittes eine Korrektur erfolgen. Diese manuelle Zuweisung kann in der Datenbank hinterlegt werden, sodass bei erneutem Durchlauf der Programmlogik die korrekte Zuweisung bekannt ist.

Durch die mehrstufige Bewertungslogik ergeben sich verschiedene Fälle, in die die Bauteile eingeordnet werden. Jedem Fall wird eine Farbe zugewiesen, in der alle Bauteile aus dem jeweiligen Fall eingefärbt werden. So lässt sich in dem Bauzustandsmodell anhand der Farbe der Bauteile die Genauigkeit der Zuweisung zum Verbauschritt erkennen. Bild 5.8 zeigt die unterschiedlichen Fälle sowie die zugeordnete Farbe.

Je Suchmethode können drei Fälle unterschieden werden. Es kann erstens sein, dass ein Prozessschritt gefunden wird, sodass eine Zuordnung eindeutig ist. Es kann zweitens sein, dass mehrere Prozessschritte zugewiesen werden, wobei alle Prozessschritte vor oder alle nach dem in Schritt B1 (Bild 5.6) gewählten Prozessschritt liegen. In diesem Fall ist eindeutig, ob das Bauteil ein oder ausgeblendet werden muss. Drittens kann es vorkommen, dass mehrere Prozessschritte zugewiesen werden und dass mindestens ein Prozessschritt vor und einer nach dem gewählten Prozessschritt in der Vorrangfolge eingeordnet sind. Dieser dritte Fall sollte immer manuell überprüft werden. Erst wenn alle Bauteile eindeutig einem Prozessschritt zugewiesen werden können, können diese korrekt ein- und ausgeblendet werden (Schritt A4 in Bild 5.6). Zudem kann der Nutzer das Umsortieren des CAD-Strukturbaums in Montagefolge anstoßen (Schritt A5 in Bild 5.6).

Farbe	Fall	Suchverfahren
Green	Über die Bauteilsachnummer wurde eine Station gefunden, wo das Bauteil verbaut wird.	Modul + <u>Sachnummer</u> (+ Bauteilart)
Light-Green	Über die Bauteilsachnummer wurden mehrere Stationen gefunden. Alle liegen vor/nach der Eingabestation, sodass sie eindeutig ein-/ausgeblendet werden können.	Modul + <u>Sachnummer</u> (+ Bauteilart)
Light-Blue	Über die Bauteilsachnummer wurden mehrere Stationen gefunden. Mindestens eine Station liegt vor und mindestens eine Station liegt nach der Eingabestation.	Modul + <u>Sachnummer</u> (+ Bauteilart)
Yellow	Über die Bauteilbezeichnung wurde eine Station gefunden, wo das Bauteil verbaut wird.	Modul + <u>Bezeichnung</u> (+ Bauteilart)
Lemon-Chiffon	Über die Bauteilbezeichnung wurden mehrere Stationen gefunden. Alle liegen vor/nach der Eingabestation, sodass sie eindeutig ein-/ausgeblendet werden können.	Modul + <u>Bezeichnung</u> (+ Bauteilart)
Blue	Über die Bauteilbezeichnung wurden mehrere Stationen gefunden. Mindestens eine Station liegt vor und mindestens eine Station liegt nach der Eingabestation.	Modul + <u>Bezeichnung</u> (+ Bauteilart)
Orange	Über die Schlüsselwörter, die in der Datenbank bewertet wurden, wurde erkannt, um welches Bauteil es sich handelt. So kann eine Station ermittelt werden.	Modul + <u>Schlüsselwörter</u> (+ Bauteilart)
Purple	Über die Bauteilart wurden auf Basis anderer Bauteile innerhalb der selben Bauteilart Stationen zugeordnet.	Modul + <u>Bauteilart</u>
Red	Zu dem Bauteil konnte keine Station gefunden werden.	Alle Suchverfahren

Bild 5.8: Farblogik für die Bauzustandserzeugung

Color Logic for the Creation of the Assembly State

Daraufhin wird auf Basis der Liste mit der produktspezifischen Montagefolge ein CAD-Strukturbaum erzeugt, der in der ersten Hierarchieebene untereinander die Montageprozessschritte enthält (siehe Bild 5.9). In jedes Prozesselement des Baumes werden die Bauteildateien eingehängt, die in dem jeweiligen Schritt zugeführt werden (z. B. Schritt 220 in Bild 5.9). Wird in dem Prozessschritt kein Bauteil zugeführt, sondern nur anderweitig bearbeitet, bleibt die Struktur leer (z. B. Schritt 222 in Bild 5.9).

<p>219. ...</p> <p>220. Torsionsschwingungsdämpfer zuführen ❖ Torsionsschwingungsdämpfer</p> <p>221. Schrauben Torsionsschwingungsdämpfer zuführen ❖ Schraube 1 ❖ Schraube 2</p> <p>222. Torsionsschwingungsdämpfer verschrauben</p> <p>223. Motor wenden</p> <p>224. Vormontage – Ölwanne zuführen ❖ Ölwanne 3-Zylinder</p> <p>225. Vormontage – Schrauben Ölwanne zuführen ❖ Schraube 1 ❖ Schraube 2 ❖ Schraube 3 ❖ Schraube 4</p> <p>226. Vormontage – Dichtmittel auf Ölwanne auftragen</p> <p>227. Vormontierte Baugruppe (Ölwanne mit Schrauben) zuführen</p> <p>228. Ölwanne verschrauben</p> <p>229. Motor wenden</p> <p>230. Zylinderkopfdichtung zuführen ❖ Zylinderkopfdichtung 3-Zylinder</p> <p>231. ...</p>	<p>Legende:</p> <p>1. Prozessschritt (Bauteilart- Prozess)</p> <p> ❖ Bauteil- variante</p>
--	---

Bild 5.9: In Montagereihenfolge umsortierter CAD-Strukturbaum

CAD Structure Tree sorted in Assembly Sequence

Anders als bei LEISTNER ET AL. [LEIS19] wird der Strukturbaum nicht weiter hierarchisch untergliedert. Dadurch wird sichergestellt, dass auch beim Konvertieren des neu erzeugten Produktmodells in ein alternatives Format die Struktur beibehalten wird. So wird der leichte Austausch der Modelle mit anderen CAD-Konstruktionssystemen oder CAD-Viewern ermöglicht. Zudem lassen sich die in einem Prozessschritt noch nicht verbauten Bauteile sehr einfach ausblenden, indem alle darunter liegenden Prozesselemente im Strukturbaum ausgeblendet werden.

Vormontageprozesse müssen beim automatischen Aufbau des Strukturbaums gesondert betrachtet werden (z. B. Schritt 224-226 in Bild 5.9). Handelt es sich um einen Vormontageprozess wird diesem in der Bezeichnung der Begriff Vormontage mit nachgestelltem Gedankenstrich vorangestellt. Das Zuführen der vormontierten Baugruppe wird im Strukturbaum als gesonderter Prozess dargestellt (z. B. Schritt 227 in Bild 5.9). In diesem Sonderfall wird jedoch kein Bauteil in die Struktur gehängt, obwohl es sich um einen Zuführprozess handelt. Vielmehr werden die Bauteile jeweils in den Zuführprozessen der Vormontage eingehängt. So kann durch Ausblenden aller Prozessschritte vor der Vormontage und aller Prozessschritte nach der Vormontage auch der Bauzustand innerhalb der Vormontage einfach visualisiert werden.

5.2 B) Rekonfigurationsräume

Reconfiguration Areas

In diesem Kapitel wird die Methodik für den ersten Lösungsbaustein zur Definition von Rekonfigurationsräumen erläutert. Sie gliedert sich in die zwei wesentlichen Schritte:

- Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen (Kapitel 5.2.1) und
- das Vorgehen zur Definition von Rekonfigurationsräumen (Kapitel 5.2.2).

In Bild 5.10 ist die Rekonfigurationsraum-Methodik dargestellt. Anhand der vorbereitenden Inputs werden die zwei Dimensionen aufgegriffen, die in der Forschungslücke B1 beschrieben werden. Es werden nur relevante Produktänderungen in Betracht gezogen (Top-Themen der Vorentwicklung) und nur die Auswirkung an unflexiblen Stationen betrachtet. Als dritte Eingangsgröße wird die in Forschungslücke B2 geforderte Ausrichtung an strategischen Unternehmenszielen in das Modell integriert. Es handelt sich um ein Zyklusmodell. Die entwickelten Rekonfigurationsräume werden verwendet, um die geplanten Produktänderungen der Vorentwicklung montagegerecht zu beeinflussen.

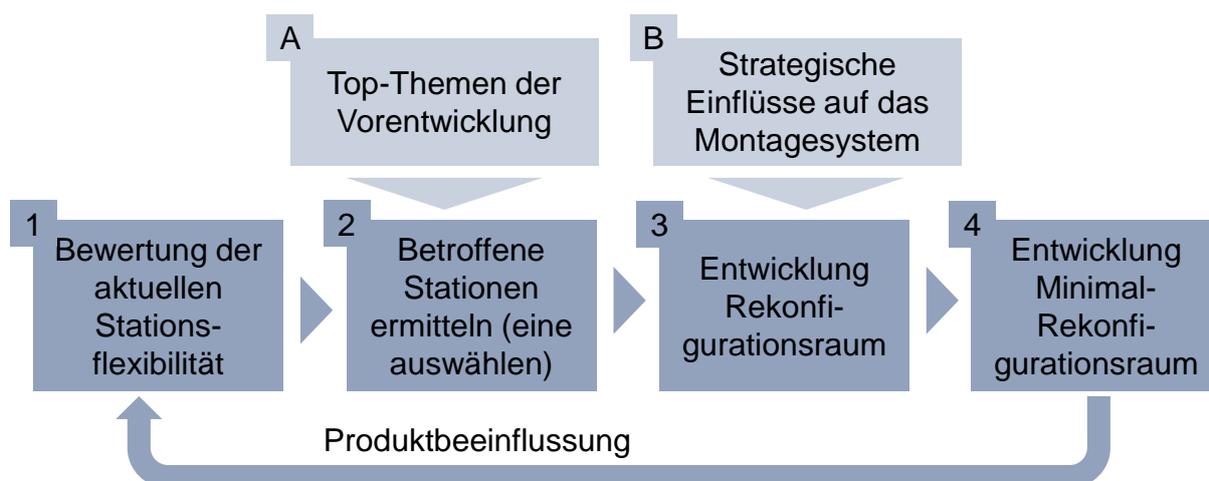


Bild 5.10: Methodik zur Rekonfigurationsraumbestimmung

Methodology for the Determination of Reconfiguration Demands

5.2.1 Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen

Determination of Reconfiguration Demands

Die für eine Rekonfigurationsraum-Erstellung kritischen Betriebsmittel werden anhand der zwei Dimensionen Stationsflexibilität und Produktänderung ermittelt. Die Dimension Produktänderung (Schritt A in Bild 5.10) wird durch die Vorentwicklungsingenieure bewertet. Diese müssen aktuell betrachtete Produktänderungen anhand ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit zum Beispiel mittels eines paarweisen Vergleichs bewerten. Hierdurch ergibt sich ein Ranking der Produktkonzepte, die mit der größten Wahrscheinlichkeit in die Serienentwicklung übernommen werden. Anschließend muss für die

Themen mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit eine kurze textuelle Beschreibung erstellt werden und anhand von Skizzen oder, falls vorhanden, bereits erzeugten CAD-Entwürfen die Änderung grafisch verdeutlicht werden. Insbesondere muss hier auch auf die Auswirkung auf im Produktbaukasten vorhandene Bauteilarten eingegangen werden. Die Häufigkeit der Aktualisierung ist anwendungsspezifisch anhand der Innovationskraft und Dynamik der Branche und des Unternehmens festzulegen.

Wurden die kritischen Produktänderungen identifiziert, können im Schritt 2 die davon betroffenen Montagestationen ermittelt werden. Hierfür ist die Information über die betroffenen Bauteilarten aus Schritt A in Bild 5.10 von besonderer Relevanz. Wird das Datenmodell aus 5.1.2 eingesetzt, können über die Verknüpfung der Bauteilart mit dem Prozess automatisch die betroffenen Betriebsmittel gefiltert werden.

Um die zweite Dimension nach BRUNNER [BRUN16] zu berücksichtigen, muss die Stationsflexibilität ermittelt werden (Schritt 1 in Bild 5.10). Mögliche Kriterien zur Identifikation der Stationsflexibilität sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Diese Liste kann unternehmensspezifisch angepasst werden, um spezifische Herausforderungen abzudecken.

Tabelle 5.1: Parameter zur Bewertung der Stationsflexibilität

Parameters for the Validation of the Flexibility of a Station

Kriterium	Zeichen für geringe Flexibilität
Automatisierungsgrad	vollautomatisiert
Anlagenkomplexität (Einschwingzeit, Sonderabläufe, etc.)	komplizierter Aufbau
Fehlerentdeckungswahrscheinlichkeit (Qualitätsabsicherung)	hoch
Taktzeitauslastung (Engpassstation bei Stückzahlerhöhung)	hoch
Bewegungsfreiheitsgrade (Bewegungs- und Prozessbaugruppe)	keine Flexibilität
Geometrische Flexibilität der Endeffektoren	keine Flexibilität
Flächenauslastung	hoch

Je höher der Automatisierungsgrad desto teurer sind in der Regel Integrationen neuer Produktkonzepte. Mit zunehmender Komplexität des Betriebsmittels sinkt die Beherrschbarkeit. Damit einher geht eine geringere Flexibilität für Integrationen. Ist die Fehlerentdeckungswahrscheinlichkeit bzw. der Aufwand für Qualitätsabsicherung besonders hoch, stellt die Integration neuer Produktkonzepte ein größeres Qualitätsrisiko dar. Wenn die Taktzeit eines Betriebsmittels bereits stark ausgelastet ist, ist die Wahrscheinlichkeit für eine Taktzeitüberschreitung bei Integration neuer Produktinhalte besonders hoch. Je mehr Bewegungsfreiheitsgrade das Betriebsmittel besitzt und je höher die geometrische Flexibilität der Endeffektoren ist, desto leichter lassen sich auch

neue Produktkonzepte mit dem Betriebsmittel montieren. Zuletzt ermöglicht eine geringere Flächenauslastung eine leichtere Integration von Produktänderungen.

Für jedes der beschriebenen Kriterien muss eine Skala festgelegt werden. Daraus kann anschließend eine Punktzahl je Station ermittelt werden. Eine geringe Punktzahl bedeutet eine besonders niedrige Flexibilität. Stationen mit einer geringen Punktzahl müssen folglich weiter betrachtet werden. Bei der Definition der Skalierung empfiehlt es sich lediglich qualitative Skalierungen mit wenig möglichen Ausprägungswerten zu verwenden. Dadurch wird gefördert, dass die Mitarbeiter der Montageplanung eine Bewertung schnell durchführen können. Wurde die Bewertung einmal durchgeführt, kann die Flexibilitätspunktzahl als Attribut bei dem Betriebsmittel im Datenmodell aus Kapitel 5.1.2 hinterlegt werden. Welche Flexibilitätskennzahl als kritisch zu beurteilen ist, ist abhängig von der jeweiligen Bewertungsskala. Sie muss daher unternehmensspezifisch ermittelt werden.

Ergebnis dieses ersten Schrittes sind somit die von einer Produktänderung betroffenen Betriebsmittel mit geringer genereller Flexibilität für Produktänderungen. Als Werkzeug zur Visualisierung des Ergebnisses wird eine Layoutdarstellung verwendet, in der die Flexibilität der betroffenen Betriebsmittel anhand einer Farblogik ausgezeichnet wird. Somit sind mit einem Blick die kritischen Betriebsmittel identifizierbar (Bild 5.11).

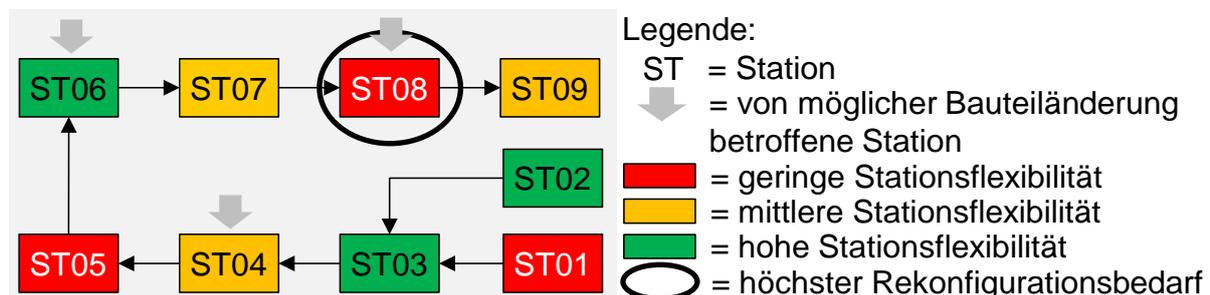


Bild 5.11: Ermittlung der betroffenen Betriebsmittel mit geringer Flexibilität

Determination of the Affected Resources with Low Flexibility

5.2.2 Definition von Rekonfigurationsräumen

Definition of Reconfiguration Areas

Sind die betroffenen Montagebetriebsmittel mit geringer Flexibilität identifiziert, werden im Schritt 3 und 4 in Bild 5.10 die Rekonfigurationsräume definiert. Dabei sind die strategischen montagerelevanten Unternehmensziele zu berücksichtigen (Schritt B in Bild 5.10). Analog zu den Veränderungstreibern in dem Veränderungsmodell nach SIEDELHOFER ET AL. [SIED17] können hier unterschiedliche Stellhebel betrachtet werden. Durch Festlegung dieser Stellhebel kann ein Bewertungsszenario erzeugt werden. Zum Beispiel kann von einer Absatzsteigerung bei gleichzeitig geringem Variantenmix ausgegangen werden. Wird hierfür ein Stationskonzept entwickelt, wird sich

dieses vermutlich deutlich abgrenzen zu einem Stationskonzept bei einem Szenario mit Absatzsteigerung und hohem Variantenmix auf einer Montagelinie.

Die Vorgabe der Zielfelder ist von erheblicher Bedeutung. Insbesondere die Priorisierung von komplementären Zielgrößen (z. B. hoher Variantenmix, kein Rüstaufwand) hilft bei der Spezifizierung der Planungsszenarien. Bei großer strategischer Unsicherheit des Marktes können an dieser Stelle mehrere Szenarien definiert werden. Je Szenario müssen im nächsten Schritt unterschiedliche Stationskonzepte entwickelt werden. Mit jedem Szenario erhöht sich folglich der Aufwand in den Folgeschritten. Es ist folglich eine hohe Sensibilität erforderlich, um den Beschreibungsaufwand angemessen zu der Vorentwicklungsphase gering zu halten.

In Bild 5.12 sind mögliche Zielfelder dargestellt. Analog eines morphologischen Kastens können strategische Zielszenarien definiert werden. An diesen Zielparametern kann sich der Montageplaner bei der Entwicklung eines Rekonfigurationskonzeptes orientieren.

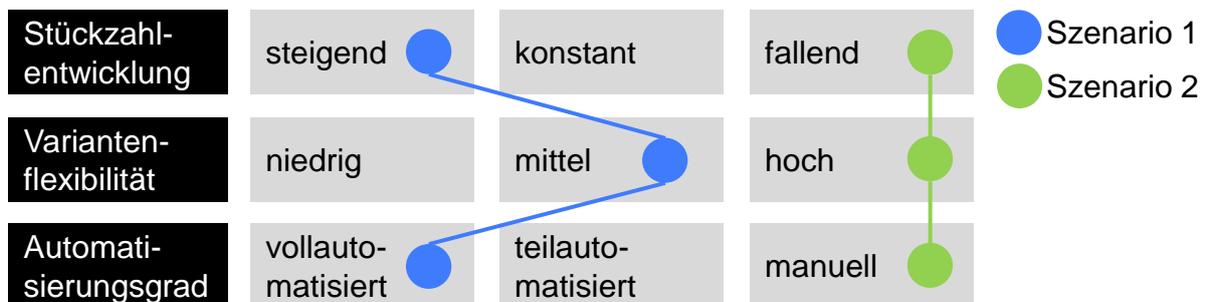


Bild 5.12: Definition zu bewertender Rekonfigurations-Szenarien

Definition of the Reconfiguration Scenarios which Need Assessment

Die Entwicklung des Rekonfigurationskonzeptes (Schritt 3 in Bild 5.10) erfolgt rein schematisch und qualitativ je Szenario. Ist beispielsweise durch eine Produktänderung das Greifkonzept des vorhandenen Betriebsmittels nicht mehr einsetzbar, kann beispielsweise definiert werden, dass ein neuer Greifer mit eigener Bewegungsbaugruppe in dem Betriebsmittel ergänzt werden muss. Diese Änderung bewirkt folglich eine Erweiterung des Rekonfigurationsraumes. An dieser Stelle kann auf die Betriebsmitteleinteilung gemäß Kapitel 5.1.1 zurückgegriffen werden, sodass sich die Auswirkung der Produktänderung klar verorten lässt. Bei der Entwicklung von Rekonfigurationsräumen ist auf bestehende Kataloge mit Rekonfigurationsmechanismen wie den von EILERS [EILE14] zurückzugreifen, um den Aufwand für die Montageplaner minimal zu halten.

Es wird weiterhin geprüft, ob die Ergänzung des neuen Greifers einem grundlegenden strategischen Zielfeld widerspricht. Ist dies nicht der Fall, wird das Anlagengrobkonzept textuell und grafisch knapp dargestellt. Es ist keine genaue Quantifizierung der

Auswirkungen in der Montage erforderlich. Lediglich eine Einteilung in grobe Kostenauswirkungsgruppen wird vorgenommen (z.B. $x < 100\text{T€}$, $100\text{T€} < x < 1\text{ Mio. €}$, $1\text{ Mio. €} < x$). Dies ermöglicht eine Einschätzung der Kritikalität der Produktänderung.

Eine reine Beschreibung der Auswirkungen neuer Produktkonzepte erfüllt nicht den Zweck der Produktbeeinflussung. Zur proaktiven Gestaltung des Produktes müssen aus dem entwickelten Grobkonzept der Anlage Anforderungen an die Produktgestaltung abgeleitet werden. Hierzu werden zunächst die Aspekte der Produktänderung notiert, die ein hohes Risiko darstellen, da sie besonders große Rekonfigurationen am Betriebsmittel erfordern. Anschließend wird beschrieben, was bei diesen Produktänderungen umgestaltet werden müsste, damit der Rekonfigurationsaufwand geringer wird. Damit ergibt sich ein im Vergleich zum zunächst ermittelten erweiterten Rekonfigurationsraum ein minimaler Rekonfigurationsraum (Schritt 4 in Bild 5.10). Auch dieser minimale Rekonfigurationsraum wird hinsichtlich seiner Kostenauswirkung eingeschätzt. Durch die Beschreibung des Risikos und der daraus abgeleiteten Anforderungen wird den Bauteilentwicklern aufgezeigt, wie die Industrialisierbarkeit des Produktkonzeptes montagegerecht optimiert werden kann.

Die Beschreibung der Rekonfigurationsräume ermöglicht zudem in späteren Phasen eine schnellere Kostenbewertung und Industrialisierung, da bereits Grobbeschreibungen von Rekonfigurationen als ‚Schubladenlösung‘ vorliegen.

5.3 C) Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten

Visualization of Resource Capabilities

Die Methodik zur Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten besteht einerseits aus einer Methode (Kapitel 5.3.1) zum Aufbau der Visualisierungsmodelle. Andererseits wird aufbauend auf der Prozessklassifizierung aus Kapitel 5.1.1 in Kapitel 5.3.2 ein Regelwerk aufgestellt, in dem je Prozessklasse definiert wird, welche Visualisierungsregeln einzuhalten sind.

5.3.1 Aufbau von Visualisierungsmodellen für Betriebsmittelfähigkeiten

Creation of Visualization Models for Resource Capabilities

Die Methode zum Aufbau der Fähigkeitsvisualisierungen in einem CAD-System gliedert sich in drei Schritte. Zunächst müssen die Betriebsmittelbaugruppen in CAD einzeln erstellt werden (Schritt 1 in Bild 5.13). Anschließend müssen die Visualisierungsmodelle erzeugt werden (Schritt 2 in Bild 5.13). Abschließend erfolgt die Veröffentlichung der Modelle in einem PDM-System und zur Verwendung in CAD-Viewern (Schritt 3 in Bild 5.13). Die Nummerierung der Überschriften der folgenden Abschnitte entspricht der Nummerierung der Schritte in Bild 5.13.

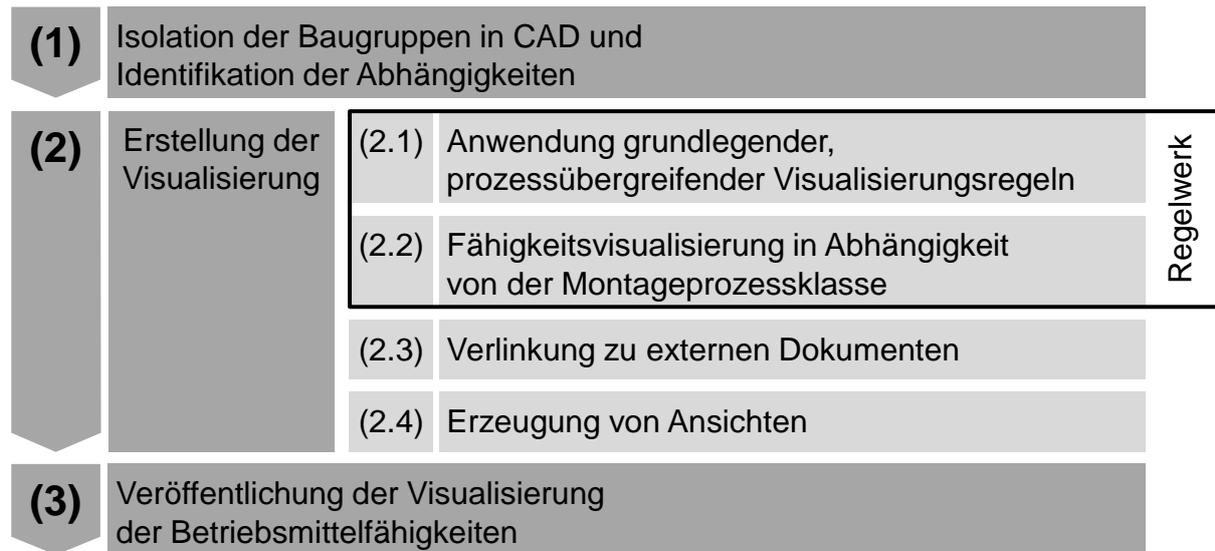


Bild 5.13: Überblick über die Visualisierungsmethode

Overview of the Visualization Method

(1) Isolation der Baugruppen in CAD & Identifikation der Abhängigkeiten

Betriebsmittelmodelle in CAD sind in der Regel in Baugruppen unterteilt. Werden jedoch Betriebsmittelmodelle über Austauschformate zwischen Anlagenhersteller und Produktionsunternehmen ausgetauscht, wird durch Konverter häufig die Struktur der Modelle aufgelöst und die Konstruktionshistorie eliminiert (vgl. Kapitel 2.3). Für die Visualisierung der Betriebsmittelfähigkeiten muss das CAD-Modell in kinematisch unabhängige Baugruppen unterteilt werden. Dafür muss die Gliederung der Bewegungsbaugruppe, Prozessbaugruppe und Endeffektoren gemäß Kapitel 5.1.1 in dem CAD-Modell des Betriebsmittels umgesetzt werden. Die erneute Einteilung der Baugruppen kann vermieden werden, wenn der Anlagenlieferant die CAD-Betriebsmittelmodelle direkt in der gewünschten Struktur und im benötigten Format liefert. Dies ist bei der Lastenhefterstellung vor Bestellung der Anlage zu berücksichtigen.

Die Modellverkürzung ist abhängig von der Anzahl der Freiheitsgrade der Bewegungsbaugruppe jedoch unabhängig von dem mit der Baugruppe ausgeführten Montageprozess. Bewegungsbaugruppen mit sechs Freiheitsgraden werden für die Erstellung der Fähigkeitsvisualisierung aus dem Modell eliminiert, da durch sie weder die Position noch die Richtung der Endeffektoren wesentlich eingeschränkt wird. Diese Annahme trifft insbesondere auf Produkte zu, die deutlich kleiner sind als der Bewegungsraum des Betriebsmittels. In diesem Fall werden lediglich die Prozessbaugruppe und die Endeffektoren weiter betrachtet. Alle restlichen Bewegungsbaugruppen mit weniger als sechs Freiheitsgraden werden vollständig in das Visualisierungsmodell übernommen. In diesem Fall ist eine Darstellung unverzichtbar, weil die Position und Richtung der Endeffektoren durch die Bewegungsbaugruppe eingeschränkt werden. Die isolierten Modelle der Bewegungs- und Prozessbaugruppen sowie der Endeffektoren werden je als einzelne Bauteile mit einem standardisierten Namenskodex abgespeichert.

Das Verhalten der sich relativ zueinander bewegenden Baugruppen und Endeffektoren muss nun ermittelt werden. Es ist beispielsweise zu klären, wie groß die Stichmaßverstellung zweier relativ zueinander beweglicher Schraubspindeln ist. Ist ein Endeffektor in Relation zu der hierarchisch übergeordneten Prozessbaugruppe nicht beweglich, wird dieser in das Modell der Prozessbaugruppe integriert. Gleiches gilt für zueinander nicht bewegliche Endeffektoren – auch sie werden in einem CAD-Modell zusammengefasst. Sind abschließend alle relativ zueinander beweglichen Teile getrennt, müssen sie in einem CAD-Modell zusammengeführt werden. Dieses ist nicht nur Ausgangslage für die Visualisierung der Betriebsmittelfähigkeiten, sondern kann auch für die softwaregestützte Baubarkeitsprüfung in Kapitel 5.4 verwendet werden. Deshalb muss dieses Gesamtmodell wiederverwendbar abgespeichert werden.

Die kinematischen Zusammenhänge der einzelnen Baugruppen und Endeffektoren zueinander kann mittels der folgenden Matrix (Bild 5.14) aufgenommen werden. Diese wird im weiteren Verlauf als Bewegungsrelationsmatrix bezeichnet. Ist mechanisch keine Relativbewegung zwischen zwei Baugruppen möglich, wird das Wort ‚starr‘ an ihrem Kreuzungspunkt notiert. Ist eine Relativbewegung möglich, wird das Wort ‚flexibel‘ notiert. Bei flexiblen Verbindungen wird zudem notiert, wenn diese nur gemeinsam beweglich sind. Dazu wird die Angabe der Gruppe mit dem Kürzel ‚Gr.‘ und einer laufenden Nummer ergänzt. In dem unten dargestellten Beispiel sind die Prozessbaugruppen starr auf der Bewegungsbaugruppe 1.1 montiert. Auf der Prozessbaugruppe 1.1.1 ist der Endeffektor 1.1.1.1 starr montiert, die anderen beiden Endeffektoren 1.1.1.2 und 1.1.1.3 können in Relation zur Prozessbaugruppe flexibel bewegt werden, sind jedoch zueinander starr (Gr. 1), also nur gemeinsam verstellbar. Auf der Prozessbaugruppe 1.1.2 sind beide Endeffektoren 1.1.2.1 und 1.1.2.2 starr montiert.

Betriebsmittel 1	Bewegungsbaugruppe 1.1	starr	starr
		Prozessbaugruppe 1.1.1	Prozessbaugruppe 1.1.2
	Endeffektor 1.1.1.1	starr	
	Endeffektor 1.1.1.2	flexibel (Gr. 1)	
	Endeffektor 1.1.1.3	flexibel (Gr. 1)	
	Endeffektor 1.1.2.1		starr
Endeffektor 1.1.2.2		starr	

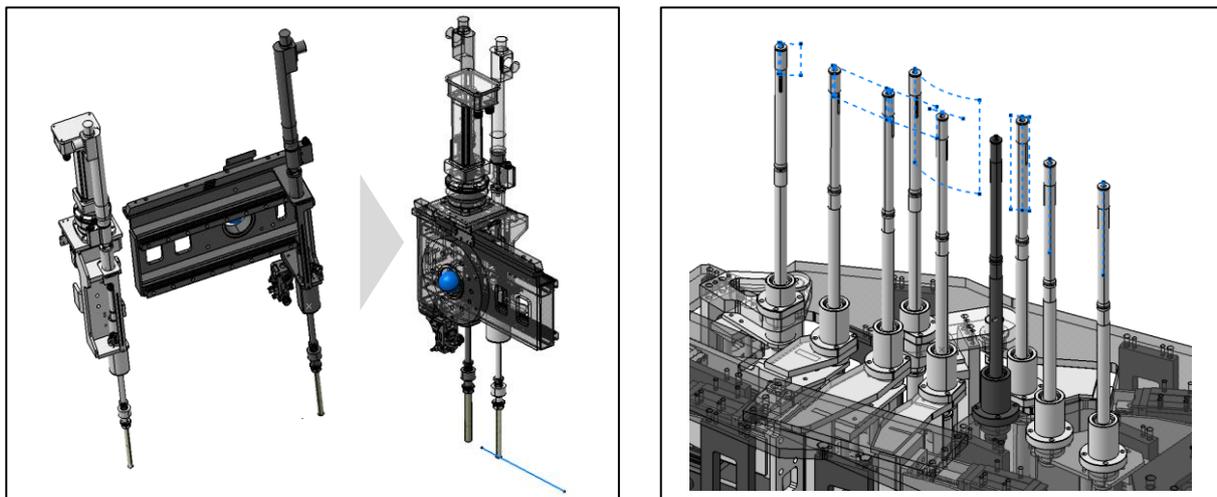
Bild 5.14: Aufbau der Bewegungsrelationsmatrix

Structure of the Matrix of Movement Relations

(2.1) Grundlegende, prozessübergreifende Visualisierungsregeln

Im zweiten Schritt des in der Einführung zu Kapitel 5.3.1 beschriebenen Vorgehens wird die eigentliche Visualisierung der Fähigkeiten erstellt. Zunächst werden grundlegende, prozessübergreifende Visualisierungsregeln definiert. Diese machen dem Anwender bereits mit plakativen Darstellungsmethoden die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale der Betriebsmittelbaugruppen zugänglich. Das erste darzustellende Merkmal ist die Unterscheidung in starre und bewegliche Elemente aufbauend auf der Bewegungsrelationsmatrix. Gemäß der grundlegenden Visualisierungsregeln (Kapitel 3.3.1), bewirken Abweichungen in Farbe, Größe und Helligkeit einen Fokus der Wahrnehmung. Deshalb wird eine einfache Farblogik verwendet, die durch klaren Kontrast die beweglichen von den starren Elementen trennt. Bewegliche Elemente werden weiß eingefärbt. Starre Elemente werden in einem dunklen Grauton eingefärbt.

Darüber hinaus ist für Bauteilentwickler eine entscheidende Information, ob ein Betriebsmittelelement Berührungspunkte zu Bauteilen des Produktes haben muss. Bauteilberührende Elemente werden ohne Transparenz dargestellt. Elemente, die nicht bauteilberührend sind, werden mit definierter Transparenz dargestellt (z. B. 60%). Ein Beispiel für ein gemäß der Farb- und Transparenzlogik angepasstes Modell ist in Bild 5.15 dargestellt.



Legende:

Flexible Baugruppen

Starre Baugruppen

Transparenz = nicht bauteilberührend

Wirkpunkte des Endeffektors:

— kontinuierliche Verstellung

- - - diskontinuierliche Verstellung

Bild 5.15: Beispielhafte Grundvisualisierung der Flexibilität von Endeffektoren

Exemplary Basic Visualization of the Flexibility of Endeffectors

Die dritte übergreifende Visualisierungsregel zeigt die kumulierten Freiheitsgrade des Endeffektors an. Durch die Orientierung von Objekten in eine Fließrichtung kann die

Aufmerksamkeit des Betrachters erreicht werden. An der äußersten, dem Produkt zugewandten Seite des Betriebsmittels wird dementsprechend der Start- und Endpunkt der effektiven Kinematik des Endeffektors eingezeichnet. Dafür werden die Freiheitsgrade der Bewegungsbaugruppe, Prozessbaugruppe und des Endeffektors addiert. Die beiden Punkte werden miteinander durch eine blaue Linie verbunden. Dadurch werden alle möglichen Wirkpunkte des Endeffektors im Visualisierungsmodell sichtbar. Eine Kinematik kann durch kontinuierliche (z. B. elektrische) oder diskrete (z. B. pneumatische) Verstellung erreicht werden. Ist die Verstellung kontinuierlich, können alle Punkte zwischen Start- und Endpunkt erreicht werden und die Linie wird durchgezogen gezeichnet. Sind mehrere Verstellungstufen diskontinuierlich erreichbar, werden die einzelnen erreichbaren Positionen als Punkte eingezeichnet und mit gestrichelten Linien verbunden. Der Fall einer kontinuierlich verstellbaren Schraubspindel auf einem Linearschlitten ist anhand der blauen Linie in Bild 5.15 dargestellt.

Ist die Verstellung in mehrere Richtungen möglich, müssen alle Extrempunkte ermittelt werden. Daraus ergibt sich dann eine aus mehreren Punkten verbundene Fläche, die sämtliche erreichbaren Punkte beinhaltet. Hat die Bewegungsbaugruppe des Endeffektors sechs Freiheitsgrade, wird dies bei der Darstellung der Wirkpunkte des Endeffektors außer Acht gelassen. Am Flansch der Prozessbaugruppe zur Bewegungsbaugruppe wird zudem eine blaue Kugel dargestellt, die andeutet, dass an dieser Stelle 6-Freiheitsgrade wirken.

(2.2) Fähigkeitsvisualisierung in Abhängigkeit der Montageprozessklasse

Die bisher beschriebenen Visualisierungsregeln sind unabhängig von dem Montageprozessstypen, der durch das Betriebsmittel ausgeführt wird. In Schritt 2.2 (Bild 5.13) werden nun die prozessspezifisch relevanten Informationen für den Bauteilentwickler in das Visualisierungsmodell eingefügt. Diese entsprechen den Fähigkeitsparametern aus Kapitel 5.1.1. Es müssen die für die montagegerechte Produktbeeinflussung relevanten Parameter ausgewählt werden. Dies sollte in einem Gremium erfolgen, in dem sich alle am Produktgestaltungsprozess beteiligten Akteure auf die relevanten Parameter einigen. Damit wird ein Konsens erzeugt, der eine grundlegende Voraussetzung für eine technische Regel ist (vgl. Kapitel 3.3.4). Um die baubarkeitsrelevanten Fähigkeitsparameter in dem Visualisierungsmodell abzubilden, müssen für sie Visualisierungsregeln definiert werden. So kann sichergestellt werden, dass der gleiche Parameter immer in der gleichen Form dargestellt wird. Dadurch wird die schnelle Wiedererkennbarkeit ähnlicher Zusammenhänge gefördert.

Für die aus der Literatur ermittelten Prozessklassen (vgl. Kapitel 5.1.1) und ihre Fähigkeitsparameter wurden im Rahmen dieser Arbeit Visualisierungsregeln definiert. Der Aufbau des Regelwerkes ist in Kapitel 5.3.2 näher erläutert. Es wird sich bei mehreren der Regeln des Werkzeuges der Anmerkungen bedient. Dies können Textelemente, Bemaßungen oder Verlinkungen zu externen Dokumenten sein. Durch Platzierung dieser Anmerkungen im CAD-Modell an der Schnittstelle des Betriebsmittels zum Bauteil

ist für Bauteilentwickler ohne weitere Interpretationsschnittstellen schnell erkennbar, wo die Betriebsmittelfähigkeit auf das Bauteil wirkt.

Alle Anmerkungen werden in einem assoziativen Bauteil abgelegt (vgl. Kapitel 3.3.1), sodass die Änderung einzelner Baugruppen der Betriebsmittelmodelle keine Auswirkung auf die Funktionsweise des Visualisierungsmodells hat. Der Anwender muss sich ausschließlich in diesem assoziativen Bauteil bewegen, da darin alle für ihn relevanten Informationen gebündelt werden.

Es wird zwischen Anmerkungen unterschieden, die für das gesamte Betriebsmittel relevant sind und Anmerkungen, die nur einzelne Baugruppen näher erläutern. Anmerkungen, die für das ganze Betriebsmittel relevant sind, werden in einem einzelnen Anmerkungkasten platziert, der keine Verbindung zu einer Geometrie des Betriebsmittelmodells hat. Zum Beispiel wird hier der Gültigkeitszeitraum angegeben, in dem die Betriebsmittel wie in dem Visualisierungsmodell dargestellt in den Montagelinien verbaut sind. Alle anderen Anmerkungen müssen zum Beispiel mittels eines Pfeils mit einer Geometrie des Bauteils verknüpft werden.

Entscheidend für die Anwendbarkeit durch Mitarbeiter ohne vertiefte Expertise in der Montagetechnik ist die Strukturierung der Modelle (Bild 5.16).

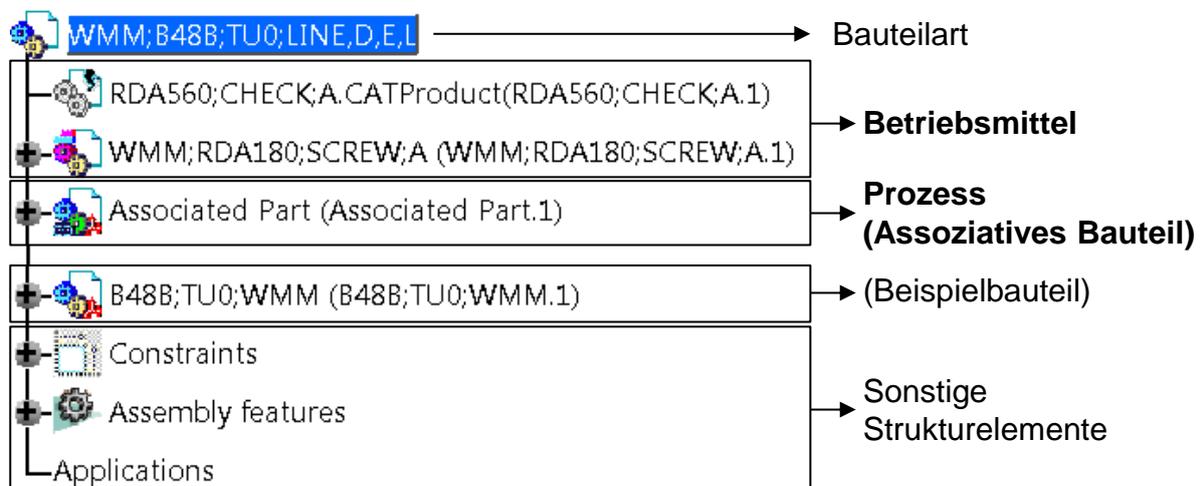


Bild 5.16: Struktur der Visualisierungsmodelle

Structure of the Visualization Models

Ausgehend von der typischen Organisation von Entwicklungsabteilungen nach Bauteilarten wird für jede Bauteilart ein eigenes Visualisierungsmodell erzeugt. In der nächsten Gliederungsebene sind zwei Sichten in dem Visualisierungsmodell abzubilden. Einerseits die Prozesssicht, also die Abbildung aller Bauteilart-Prozesse und andererseits die Betriebsmittelsicht, also die Abbildung sämtlicher Betriebsmittel im Produktionsnetzwerk, die die Montageprozesse an der betrachteten Bauteilart ausführen. Die Strukturierung nach Montageprozessen ist für die Anwender der Visualisierungsmodelle entscheidend. Sie untergliedert sich in eine Prozessablaufdarstellung und Informationen zu den produktrelevanten Betriebsmittelfähigkeiten in dem assoziativen

Bauteil. Die Strukturierung nach Betriebsmitteln wird für die Erstellung und Pflege der Visualisierungsmodelle benötigt. Darüber hinaus sind beispielhaft ein Bauteil und weitere Strukturelemente in dem CAD-Modell erforderlich. Die einzelnen Knoten in dem CAD-Visualisierungsmodell müssen miteinander verknüpft sein, um redundante Informationen und damit einen hohen Pflegeaufwand zu vermeiden.

(2.3) Verlinkung zu externen Dokumenten

Für Bauteilentwickler soll das Betriebsmittelmodell die zentrale Informationsquelle bei der montagegerechten Gestaltung des Bauteils sein. Nachdem die wesentlichen Informationen prozessübergreifend und -spezifisch direkt im Visualisierungsmodell hinterlegt sind, können über eine Verlinkung zu externen Dokumenten weiterführende Informationen angehängt werden. Es empfiehlt sich eine Verlinkung zu einem Dokumentenmanagementsystem, sodass immer der aktuellste Informationsstand am Visualisierungsmodell verfügbar ist. Hier können zum Beispiel die Rekonfigurationsraummodelle hinterlegt werden, falls zu dem betrachteten Betriebsmittel bereits vorhanden. Darüber hinaus können zum Beispiel Musterbauteile verlinkt werden, die bereits montagegerecht gestaltet sind oder Betriebsmittel verlinkt werden, die die gleiche Schnittstelle am Produkt verwenden. Besonders in weltweiten Produktionsnetzwerken, in denen die Bauteilentwickler nicht produktionsnah arbeiten, sind Prozessablaufbeschreibungen und Videos des Montageprozesses hilfreich. Die Verlinkung zu externen Dokumenten wird immer in der Anmerkung mit der Benennung ‚Additional Information‘ hinterlegt. Für alle externen Verlinkungen wird nur eine zentrale Anmerkung erstellt.

(2.4) Erzeugung von Ansichten des Visualisierungsmodells

Da ein Visualisierungsmodell sämtliche Betriebsmittel beinhaltet, die eine bestimmte Bauteilart bearbeiten, kann dieses schnell unübersichtlich werden. Das gilt insbesondere, wenn bei Anwendung der prozessspezifischen Regeln viele Linien und Textelemente am CAD-Modell platziert sind. Deshalb werden im nächsten Schritt bei der Modellerstellung je Montageprozess Ansichten voreingestellt. Diese beinhalten nur die Visualisierungen der für den betrachteten Montageprozess relevanten Fähigkeiten. In einem hochvernetzten Produktionssystem können jedoch mehrere Standorte existieren, die den gleichen Bauteilart-Prozess mit unterschiedlichen Betriebsmitteln ausführen. Jedes Betriebsmittel steht in einer Montagelinie, auf der mehrere Produktgruppen montiert werden. Bauteilentwickler kennen nicht immer die Belegung der Montagelinie. Deshalb werden die voreingestellten Ansichten je Kombination aus Betriebsmittel, Montageprozess und Produktgruppe erzeugt. Die Benennung dieser Ansichten muss folglich auch diese drei Informationen enthalten und wird wie folgt definiert:

[Bauteilart-Prozess]_[Betriebsmittel]_[Produktgruppe_01]_[Produktgruppe_N]

Um die Ausrichtung der Ansicht festzulegen werden Anmerkungsebenen (Views) verwendet. Die Anmerkungsebene muss zur optimalen Einsehbarkeit auf die Wirkstelle

der Endeffektoren des Betriebsmittels ausgerichtet werden. Die Ansicht muss senkrecht zu der Anmerkungsebene ausgerichtet werden, sodass die optimale Lesbarkeit der Anmerkungen gegeben ist. Dabei muss das komplette Visualisierungsmodell des Betriebsmittels, also Endeffektoren, Prozessbaugruppe und, falls dargestellt, Bewegungsbaugruppe in der Ansicht enthalten sein. Die Ansichten werden in dem assoziativen Bauteil erzeugt und Betriebsmittelgeometrien werden lediglich mittels Referenzen bzw. Instanzen in dieses eingebettet. Bild 5.17 zeigt den Ausschnitt des Strukturbaums, in dem die Ansichten abgelegt sind, sowie eine aktivierte Ansicht.

Pro Bauteilart-Prozess und Betriebsmittel werden drei Standardansichten (Captures) generiert (Bild 5.17):

- *Ansicht Label:*
Textanmerkung zur Benennung der Endeffektoren, Informationen zum gesamten Betriebsmittel und externe Verlinkungen
- *Ansicht Measurement:*
Bemaßung der Abstände der einzelnen Endeffektoren zueinander
- *Ansicht Tolerance:*
Darstellung von Toleranzen durch mechanische und physikalische Eigenschaften.

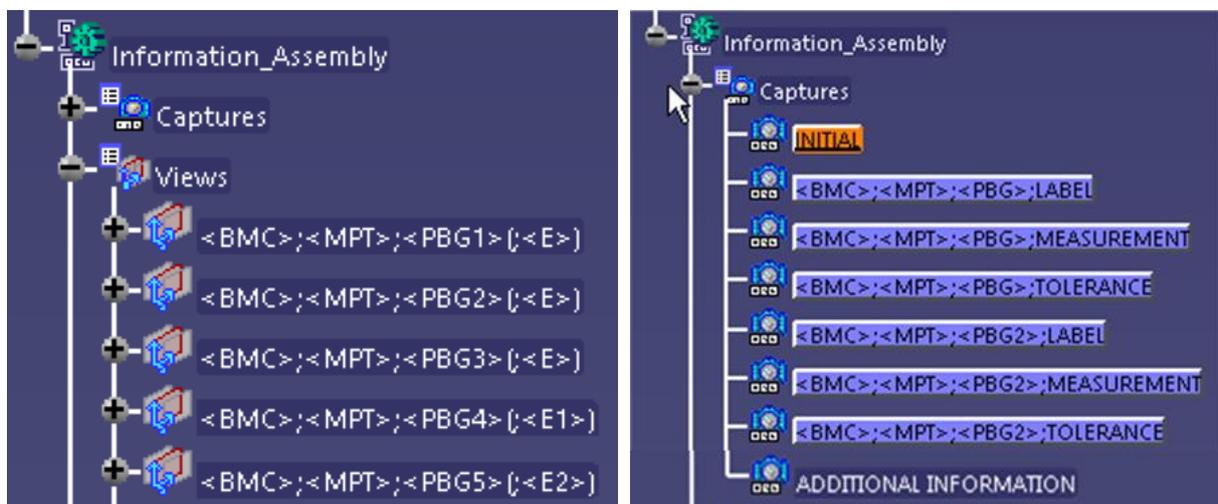


Bild 5.17: Anmerkungsebenen und Ansichten im Visualisierungsmodell

Views and Captures in the Visualization Models

(3) Veröffentlichung der Betriebsmittelvisualisierung und Anwendung

Die Art der Speicherung der Visualisierungsmodelle ist von hoher Bedeutung für die Akzeptanz der Anwender. Bauteilkonstrukteure arbeiten in einem CAD-Konstruktionsprogramm. Wird das Visualisierungsmodell in dem gleichen Format erzeugt, ist die Kompatibilität sichergestellt. Zudem ist die Pflege der Modelle bei Umbauten an den Betriebsmitteln somit sehr einfach. Das Modell, das zur Pflege vorgesehen ist, darf nicht zeitgleich das Anwendungsmodell sein. Für die Anwendung muss

immer ein schreibgeschütztes Modell veröffentlicht werden. Damit ist auch der Veröffentlichungszeitpunkt des Modells abgespeichert, wodurch ein Rückschluss auf die Aktualität der Daten gezogen werden kann. Die Modelle müssen in einem PDM-System abgelegt werden, das assoziative Modelle speichern kann, damit das Dateimanagement nicht manuell erfolgen muss.

Es gibt viele Anwender in einem Unternehmen, die kein CAD-Konstruktionsprogramm bedienen können, oder aufgrund zu teurer Lizenzen lediglich in CAD-Viewern arbeiten. Für sie muss der Export des Modells in einem Austauschformat sichergestellt werden.

Für die Anwendung der Modelle muss sich der Anwender das Visualisierungsmodell zunächst laden. Er kann sich ein zu untersuchendes Bauteilmodell zu dem Fähigkeitsmodell hinzuladen. Hier wird die Bedeutung eines gleichen Koordinatensystems der Produkte und Betriebsmittel deutlich. Das Bauteil muss nicht erst in dem Betriebsmittelkoordinatensystem ausgerichtet werden. Nun wird in den Modellabschnitt ‚Prozess‘ gewechselt (vgl. Bild 5.16). Dort kann die Ansicht des zu untersuchenden Prozessschrittes geladen werden. Darin ist das Video des Prozesses verlinkt, das zunächst betrachtet wird. Nun kann durch die Beachtung der Flexibilitätsbereiche (blaue Linie und transparente Darstellung) beurteilt werden, ob die am Bauteil vorgesehene Schnittstelle zum Betriebsmittel durch die Betriebsmittelfähigkeiten erreichbar ist. Im nächsten Schritt können die prozessspezifischen Informationen analysiert werden. Ist diese Untersuchung abgeschlossen, kann das nächste Betriebsmittel ausgewählt werden, mit dem das Bauteil verbaut werden soll.

Wird bei diesen Analysen ein Baubarkeitskonflikt entdeckt, muss zunächst geprüft werden, ob die Konstruktion des Bauteils angepasst werden kann. Ist das möglich, hat das Visualisierungsmodell zur montagegerechten Produktgestaltung beigetragen und zeitgleich die Montageplaner entlastet. Ist dies nicht möglich, können bereits hinterlegte Rekonfigurationsräume über die Anmerkung ‚Additional Information‘ geladen werden. Decken auch diese nicht die gewünschte Produkthanforderung ab, muss der Montageplaner konsultiert werden, um die Baubarkeit genauer zu untersuchen und gegebenenfalls notwendige Umbauten zu planen und wirtschaftlich zu bewerten.

5.3.2 Regelwerk zur Visualisierung

Regulations for Visualization

Für die Schritte 2.1 und 2.2 aus Bild 5.13 wird ein Regelwerk definiert. Damit soll sichergestellt werden, dass gleiche Betriebsmittelfähigkeiten auch immer in der gleichen Art dargestellt werden. Im Rahmen der Forschungstätigkeiten zu dieser Arbeit wurde ein initiales Regelwerk erstellt. Dieses muss branchen- und unternehmensspezifisch erweitert oder adaptiert werden. Wiederverwendbare Merkmale des Regelwerkes sind die Struktur und das Vorgehen zur Erstellung des Regelwerkes.

Bei der Erstellung des Regelwerkes ist darauf zu achten, sämtliche an der montagegerechten Produktgestaltung beteiligten Fachstellen im Unternehmen mit einzubeziehen. Hier sind insbesondere die Montageplanung, die Betriebsmittelkonstruktion sowie die Bauteilentwicklung und -konstruktion mit einzubeziehen. Weitere Teilnehmer können zum Beispiel Qualitätsstellen oder Berechnungsingenieure sein. In Branchen mit vielen Lieferanten kann auch das Einbeziehen des Bauteil- und Anlagenlieferanten sinnvoll sein. Es gilt anschließend zu trennen zwischen Anwendern und Informationslieferanten. Informationslieferanten müssen definieren, welche Information zwingend bei den Anwendern ankommen soll. Andererseits müssen die Anwender definieren, welche Informationen mindestens benötigt werden, um das Produkt montagegerecht zu gestalten. Die Vereinigungsmenge dieser Informationen ergibt die zu visualisierenden Betriebsmittelfähigkeiten. Bei der Sammlung der zu visualisierenden Fähigkeiten ist die Orientierung an den Montageprozessstypen hilfreich. Aufbauend auf der Klassifizierung der Montageprozesse aus Kapitel 5.1.1 müssen je Montageprozessstyp die relevanten Fähigkeiten ausgewählt werden.

Dabei ist eine Vorfilterung wichtig, damit die Informationsmenge für Anwender und Ersteller der Modelle beherrschbar bleibt. Je mehr Informationen dargestellt werden, desto höher ist der Pflegeaufwand. In dem Gremium der beteiligten Fachstellen muss Einigkeit über die Notwendigkeit der Visualisierung der Fähigkeiten bestehen.

Aus Montageprozessstypen und Fähigkeiten kann eine Matrix aufgespannt werden, die die Menge der zu erarbeitenden Visualisierungsregeln vorgibt [vgl. LOTT12, S. 11]. Dies ist in Bild 5.18 beispielhaft dargestellt.

Eine Fähigkeit kann bei mehreren Montageprozessstypen visualisiert werden müssen. Je Montageprozessstyp müssen deshalb zunächst in der Matrix die nicht relevanten Fähigkeiten markiert werden (in Bild 5.18 schwarz). Anschließend können die Regeln aufgestellt werden. Beispiel für eine zu visualisierende Betriebsmittelfähigkeit kann zum Beispiel das Anzugsverfahren bei einem Schraubprozess sein. Bei allen anderen Montageprozessstypen außer den Schraubprozessen kann diese Betriebsmittelfähigkeit als nicht relevant markiert werden.

Montageprozessstypen													Betriebsmittelfähigkeiten																
													Kinematik (K)			Schnittstelle Produkt zu Betriebsmittel (S)			Kräfte (F)			Betriebsmittelabmaße (A)			Prozessinformationen / Expertenwissen (P)				
													K ₁	K ₂	K _n	S ₁	S ₂	S _n	F ₁	F ₂	F _n	A ₁	A ₂	A _n	P ₁	P ₂	P _n		
Handhaben (H)			Fügen (J)			Inbetriebnahme (I)			Hilfsprozesse (A)			Sonderoperationen (S)			Dokumentennummer														
HT _n	HT ₂	HT ₁	JT _n	JT ₁	IT _n	IT ₂	IT ₁	AT _n	AT ₂	AT ₁	ST _n	ST ₂	ST ₁	Herausgeber															
R _{TnK1}	R _{T2K2}	R _{T1K1}	R _{TnK1}	R _{T1K2}	R _{TnK1}	R _{T2K1}	R _{T1K2}	R _{TnK1}	R _{T2K1}	R _{T1K1}	R _{TnK1}	R _{T2K1}	R _{T1K1}	Autor															
R _{TnK2}	R _{T2K2}	R _{T1K2}	R _{TnK2}	R _{T1K2}	R _{TnK2}	R _{T2K2}	R _{T1K2}	R _{TnK2}	R _{T2K2}	R _{T1K2}	R _{TnK2}	R _{T2K2}	R _{T1K2}	Status: _____ Datum _____															
R _{TnKn}	R _{T2Kn}	R _{T1Kn}	R _{TnKn}	R _{T1Kn}	R _{TnKn}	R _{T2Kn}	R _{T1Kn}	R _{TnKn}	R _{T2Kn}	R _{T1Kn}	R _{TnKn}	R _{T2Kn}	R _{T1Kn}	Titel															
R _{TnS1}	R _{T2S1}	R _{T1S1}	R _{TnS1}	R _{T1S1}	R _{TnS1}	R _{T2S1}	R _{T1S1}	R _{TnS1}	R _{T2S1}	R _{T1S1}	R _{TnS1}	R _{T2S1}	R _{T1S1}	Tätigkeitsbeschreibung															
R _{TnS2}	R _{T2S2}	R _{T1S2}	R _{TnS2}	R _{T1S2}	R _{TnS2}	R _{T2S2}	R _{T1S2}	R _{TnS2}	R _{T2S2}	R _{T1S2}	R _{TnS2}	R _{T2S2}	R _{T1S2}	Kurzbeschreibung in Prosa: _____															
R _{TnSn}	R _{T2Sn}	R _{T1Sn}	R _{TnSn}	R _{T1Sn}	R _{TnSn}	R _{T2Sn}	R _{T1Sn}	R _{TnSn}	R _{T2Sn}	R _{T1Sn}	R _{TnSn}	R _{T2Sn}	R _{T1Sn}	Handlungsanweisung: _____															
R _{TnF1}	R _{T2F1}	R _{T1F1}	R _{TnF1}	R _{T1F1}	R _{TnF1}	R _{T2F1}	R _{T1F1}	R _{TnF1}	R _{T2F1}	R _{T1F1}	R _{TnF1}	R _{T2F1}	R _{T1F1}	Schritt 1 Bild 1															
R _{TnF2}	R _{T2F2}	R _{T1F2}	R _{TnF2}	R _{T1F2}	R _{TnF2}	R _{T2F2}	R _{T1F2}	R _{TnF2}	R _{T2F2}	R _{T1F2}	R _{TnF2}	R _{T2F2}	R _{T1F2}	Schritt 2 Bild 2															
R _{TnFn}	R _{T2Fn}	R _{T1Fn}	R _{TnFn}	R _{T1Fn}	R _{TnFn}	R _{T2Fn}	R _{T1Fn}	R _{TnFn}	R _{T2Fn}	R _{T1Fn}	R _{TnFn}	R _{T2Fn}	R _{T1Fn}	Schritt ... Bild ...															
R _{TnA1}	R _{T2A1}	R _{T1A1}	R _{TnA1}	R _{T1A1}	R _{TnA1}	R _{T2A1}	R _{T1A1}	R _{TnA1}	R _{T2A1}	R _{T1A1}	R _{TnA1}	R _{T2A1}	R _{T1A1}	Schritt n Bild n															
R _{TnA2}	R _{T2A2}	R _{T1A2}	R _{TnA2}	R _{T1A2}	R _{TnA2}	R _{T2A2}	R _{T1A2}	R _{TnA2}	R _{T2A2}	R _{T1A2}	R _{TnA2}	R _{T2A2}	R _{T1A2}	Gebot															
R _{TnAn}	R _{T2An}	R _{T1An}	R _{TnAn}	R _{T1An}	R _{TnAn}	R _{T2An}	R _{T1An}	R _{TnAn}	R _{T2An}	R _{T1An}	R _{TnAn}	R _{T2An}	R _{T1An}	Verbot															
R _{TnP1}	R _{T2P1}	R _{T1P1}	R _{TnP1}	R _{T1P1}	R _{TnP1}	R _{T2P1}	R _{T1P1}	R _{TnP1}	R _{T2P1}	R _{T1P1}	R _{TnP1}	R _{T2P1}	R _{T1P1}	Hinweis															
R _{TnP2}	R _{T2P2}	R _{T1P2}	R _{TnP2}	R _{T1P2}	R _{TnP2}	R _{T2P2}	R _{T1P2}	R _{TnP2}	R _{T2P2}	R _{T1P2}	R _{TnP2}	R _{T2P2}	R _{T1P2}																
R _{TnPn}	R _{T2Pn}	R _{T1Pn}	R _{TnPn}	R _{T1Pn}	R _{TnPn}	R _{T2Pn}	R _{T1Pn}	R _{TnPn}	R _{T2Pn}	R _{T1Pn}	R _{TnPn}	R _{T2Pn}	R _{T1Pn}																

R = Regel, T = Montageprozessstyp

Bild 5.18: Übersichtsmatrix des Regelwerks mit Verweis auf alle Visualisierungsregeln

Overview Matrix of the Framework with Reference to all Visualization Rules

Produktrelevante Darstellungsinhalte

Die in Bild 5.18 weißen Felder der Regelwerksmatrix müssen im Folgenden gefüllt werden. Anhand von Beschriftungen, Bemaßungen oder Markierungen bestimmter Betriebsmitteleigenschaften werden die produktrelevanten Betriebsmittelfähigkeiten in Form von Anmerkungen in den zuvor definierten Anmerkungsebenen visualisiert. Ist es möglich eine Visualisierungsregel für mehr als nur einen Montageprozessstypen zu definieren ist dies immer zu realisieren. Je weniger Regeln existieren, desto einfacher verständlich ist das Regelwerk. Die Regelerstellung ist als iterativer Prozess aufzufassen. Es muss zunächst eine erste Fassung der Visualisierung erstellt werden. Diese kann an einem Betriebsmittel beispielhaft umgesetzt werden und bei den Anwendern erprobt werden. Es muss anschließend überprüft werden, ob die Anwender die Visualisierung intuitiv richtig interpretiert haben. Ist das nicht der Fall muss die Regel überarbeitet und weiter vereinfacht werden.

Betriebsmittelfähigkeiten können aus Produktsicht und aus Betriebsmittelsicht dargestellt werden. Aus Produktsicht könnten zum Beispiel die für ein Betriebsmittel erreichbaren Schraubpunkte als Punktwolke dargestellt werden. Es ist jedoch nicht erkennbar, warum bestimmte Punkte nicht erreichbar sind. Aus Betriebsmittelsicht könnte die gleiche Fähigkeit dargestellt werden, indem die Flexibilität des Betriebsmittels visualisiert würde. Werden die Roboterachsen mit visualisiert, ist für den Anwender ersichtlich, wodurch der Lösungsraum eingeschränkt wird. Dies erlaubt eine leichtere Einschätzung der Kritikalität einer Verletzung der Fähigkeit und die Möglichkeiten für Rekonfiguration. Erprobungen beider Fälle und Experteninterviews bei der BMW Group haben ergeben, dass die Darstellung aus Produktsicht eher eine Ablehnung gegenüber der Visualisierung erzeugt. Deshalb müssen Fähigkeiten immer aus Betriebsmittelsicht dargestellt werden.

Jede Fähigkeit kann als Lösungsraum (z. B. mögliche Greifpunkte) oder Restriktion (z. B. Grenzen des möglichen Greifbereichs) dargestellt werden. Da der Begriff der Fähigkeiten eine positive Formulierung darstellt, ist möglichst die Darstellung des Lösungsraums zu wählen. Dadurch lässt sich die Überdeckung von Fähigkeiten und Anforderungen durch das Produkt einfacher überprüfen. Führt dies jedoch zu einer zu großen Informationsmenge, kann auf die Darstellung von Restriktionen ausgewichen werden.

Es werden grundsätzlich nur Visualisierungsregeln für automatisierte Prozesse erstellt, da die Flexibilität in manuellen Prozessen erheblich höher ist. Dadurch ist auch das Risiko einer Fähigkeitsverletzung sehr gering.

Aufbau der Visualisierungsregeln

Die Regeln sollen gemäß der ermittelten Forschungslücke als technische Regeln formuliert werden. Damit müssen sie formale Merkmale erfüllen. Jede Regel erhält deshalb eine eindeutige Dokumentennummer. In dem Dokumentenkopf wird angegeben,

wer Herausgeber und Autor ist und die Gültigkeitsdauer sowie der Gültigkeitsstatus wird festgelegt. Zudem wird ein Titel für die Regel vergeben.

In einem weiteren Abschnitt wird die Tätigkeit beschrieben. Die Tätigkeitsbeschreibung wird zunächst knapp in Prosaform erläutert, um einen Überblick über die Methode zu geben. Dies dient in erster Linie dem Anwender. Die anschließende detaillierte Handlungsanweisung ist primär auf den Ersteller der Visualisierungsmodelle ausgerichtet. Hier wird anhand einer Schritt-für-Schritt-Anleitung beschrieben, wie die Visualisierungsregel umgesetzt wird. Diese kann mit Bildern ergänzt werden, um die Umsetzung der Visualisierungsregel zu vereinfachen. An dieser Stelle muss auch die genaue Beschreibung der zu verwendenden Werkzeuge in dem vorgeschriebenen CAD-Konstruktionsprogramm erfolgen. Das entspricht der bei technischen Regeln erforderlichen Geräte- bzw. Funktionsbeschreibung.

Bild 5.18 zeigt die Einbettung einer nach diesem Standard erzeugten technischen Regel in das Regelwerk sowie eine Dokumentenvorlage zur Erzeugung einer technischen Visualisierungsregel.

Neben der Anwendbarkeit einer Visualisierungsregel für mehrere Montageprozessstypen ist auch eine Aggregation mehrerer Fähigkeiten in einer Visualisierungsregel möglich. Beispielsweise kann die Fähigkeit der Stabilität und Lage des Schwerpunktes mit der Fähigkeit der Genauigkeit zusammengefasst werden. Diese kann anhand von Toleranzvisualisierungen repräsentiert werden.

Unternehmensspezifische Erweiterung des Regelwerks

Das beschriebene Regelwerk aus dem vorherigen Abschnitt kann nur als Ausgangslage für ein Unternehmen dienen, um eine unternehmensspezifische Anpassung der Regeln vorzunehmen. Die prozessübergreifenden Visualisierungsregeln können zunächst übernommen werden. Die prozessspezifischen Regeln erfordern eine unternehmensspezifische Erstellung.

Hierfür kann es mehrere Auslöser geben. Einerseits kann ein unternehmenseigener Prozessstyp auftreten. Dafür muss folglich die Dimension Montageprozessstyp der Regelwerksmatrix (Bild 5.18) erweitert werden. Im Folgenden sind die bestehenden Fähigkeiten auf Relevanz für diesen neuen Montageprozessstypen zu prüfen. Ist die Relevanz der Fähigkeit für den Montageprozessstyp bestätigt, muss geprüft werden, ob eine der vorhandenen Visualisierungsregeln auf den neuen Montageprozessstypen angewandt werden kann. Gegebenenfalls sind neue Regeln zu erstellen. Ist diese Überprüfung für alle vorhandenen Visualisierungsregeln und Fähigkeiten abgeschlossen, muss in dem Fachgremium ermittelt werden, ob weitere prozessspezifische Fähigkeiten ergänzt werden müssen. Wenn dies der Fall ist, muss zunächst untersucht werden, ob eine zusammenfassende Darstellung mit anderen Fähigkeiten Sinn ergibt. Ist dies nicht der Fall, muss eine neue Visualisierungsregel erstellt werden.

Ein weiterer Auslöser für die Erstellung neuer Visualisierungsregeln kann die Feststellung sein, dass bei bestehenden Visualisierungsmodellen Informationen für die Bewertung der Montagegerechtigkeit eines neuen oder geänderten Bauteils fehlen. Die produktrelevanten Darstellungsinhalte müssen folglich identifiziert werden und es muss die Aggregationsmöglichkeit mit vorhandenen Fähigkeiten untersucht werden. Ist dies nicht gegeben, muss eine neue Visualisierungsregel erstellt werden.

Die beiden Auslöser und das jeweilige Vorgehen sind in Bild 5.19 dargestellt.

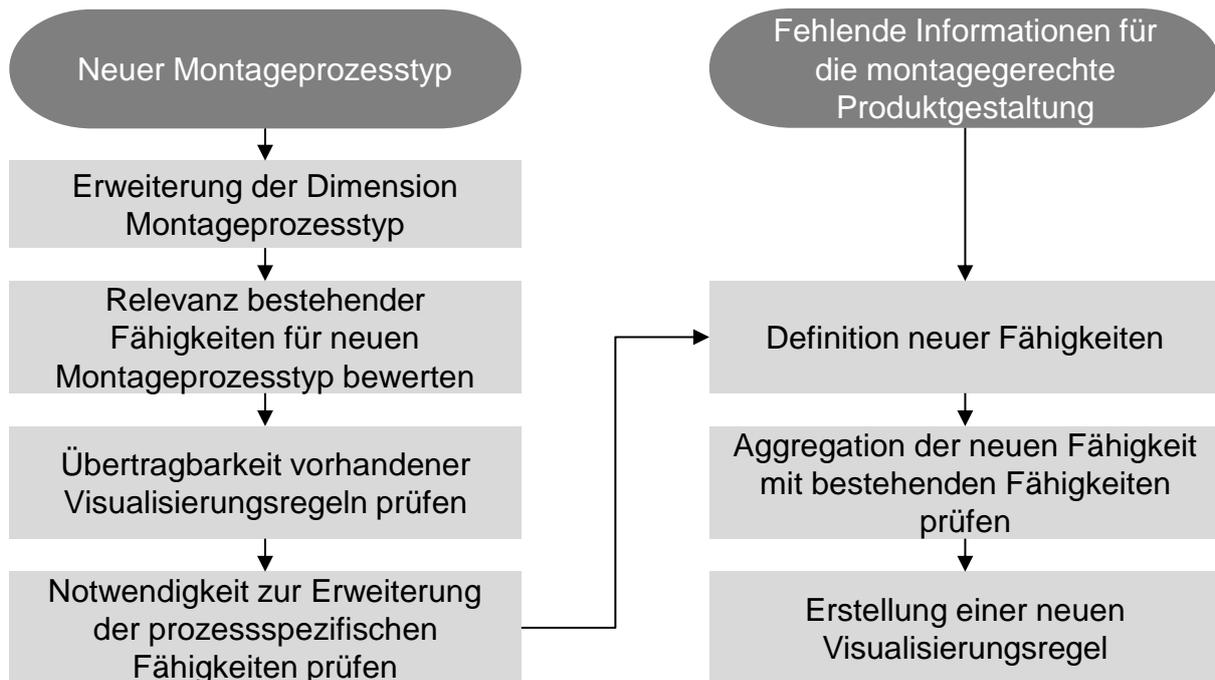


Bild 5.19: Änderungsmanagement des Regelwerkes

Change Management of the Regulation Framework

5.4 D) Softwaregestützte Baubarkeitsprüfung

Software Supported Assembly Check

In diesem Kapitel werden die Lösungsbausteine für die softwaregestützte Baubarkeitsprüfung beschrieben. Der Lösungsbaustein unterteilt sich in die parameterbasierte Prüfung und die simulative Prüfung. Dafür müssen die Betriebsmittelmodelle und Fähigkeiten vorbereitet werden (Kapitel 5.4.1). Andererseits müssen die Anforderungen aus dem Produktmodell möglichst automatisiert ermittelt werden (Kapitel 5.4.2). Sind die Fähigkeiten und Anforderungen bekannt, kann ein Abgleich erfolgen. Dazu wird ein dreistufiges Abgleichskonzept vorgestellt (Kapitel 5.4.3). Die Ergebnisse der Baubarkeitsprüfung werden abschließend standardisiert aufbereitet. Die Auswertungen und Berichte werden in Kapitel 5.4.4 erläutert.

5.4.1 Erfassung von Betriebsmittelfähigkeiten

Capturing of Resource Capabilities

Die softwaregestützte Baubarkeitsprüfung unterteilt sich in zwei Abschnitte. Einerseits werden Fähigkeiten über Simulation abgesichert. Andererseits können Fähigkeitsparameter mit Anforderungsparametern abgeglichen werden. Die Definition der Fähigkeitsparameter ist bereits in Kapitel 5.1.1 beschrieben. In dem Datenmodell aus Kapitel 5.1.2 kann das zu verwendende Prüfverfahren definiert werden.

Bestimmte Fähigkeiten müssen mit einer simulativen Prüfung abgesichert werden, um den Aufwand der Absicherung zu minimieren. Dies trifft für die kinematischen Fähigkeiten des Betriebsmittels zu. Sie müssen deshalb simulationsgerecht aufbereitet werden. Bei der Erstellung der Simulationsmodelle ist zu beachten, dass lediglich mechanische Freiheitsgrade abzubilden sind. Durch die Berücksichtigung von einprogrammierten Roboterpfaden und Achs-Verfahrwegen würde die tatsächliche Fähigkeit des Betriebsmittels zu stark eingeschränkt, da die Anpassung der Verfahrwege in der Regel nur Softwareanpassungen und damit geringe Investitionen erfordert. Mechanische Anpassungen erfordern längere Produktionsunterbrechungen und höhere Investitionen für die Umbauten.

Bei der Vorbereitung des Kinematikmodells kann auf die Ergebnisse aus Schritt 1 aus der Methode zum Aufbau der Visualisierungsmodelle zurückgegriffen werden (Kapitel 5.3.1). Die einzelnen Gruppen aus der Bewegungsrelationsmatrix müssen für die Befähigung für die Simulation um die kinematischen Relationen ergänzt werden. An dieser Stelle soll keine exakte Vorgabe erstellt werden, wie die Kinematik abgebildet werden soll. Es sind grundlegend aber die folgenden Informationen erforderlich:

Zunächst muss die Relativbewegung zwischen zwei Baugruppen ermittelt werden. Handelt es sich um eine lineare Verknüpfung (z. B. Schlitten auf Schiene) muss der Richtungsvektor der Linearachse ermittelt werden. Handelt es sich um eine rotatorische Verknüpfung muss der Richtungsvektor der Rotationsachse ermittelt werden. Es kann auch die Kombination aus rotatorischen und linearen Freiheitsgraden vorliegen. In diesem Fall muss jede Achse einzeln aufgenommen werden. Für jede Achse muss zusätzlich die Begrenzung der Achse durch mechanische Endanschläge ermittelt werden. Diese Aufnahme muss für alle Hierarchieebenen des Betriebsmittels von der Bewegungsbaugruppe bis hin zum einzelnen Endeffektor erfolgen. Jeder Baugruppe muss zudem die Information gegeben werden, ob es sich um einen Endeffektor, eine Prozessbaugruppe oder eine Bewegungsbaugruppe handelt. Eine mögliche Kinematikdefinition ist in Bild 5.20 dargestellt.

Einstellmöglichkeiten der Bewegungsachsen in dem Plugin

The screenshot shows the 'Station' configuration panel in Unreal Studio. The settings are as follows:

- Movement Type:** Discrete (dropdown)
- Enable Collision Tolerance:** Checked (checkbox)
- Collision Tolerance Distance:** 1,5 (input field)
- Movement Axes:** 1 Array elements, 3 members
 - Axis:** X 0,0, Y 0,0, Z -1,0 (dropdowns)
 - Range [cm]:** Min 0,0, Max 10,0 (input fields)
 - PreviewValue [0 to 1]:** 0,0 (input field)
- Rotation Axes:** 3 Array elements, 2 members
 - Axis:** X 1,0, Y 0,0, Z 0,0 (dropdowns)
 - Range [°]:** Min 0,0, Max 90,0 (input fields)

Annotations on the right side:

- Bewegungsart (stetig / diskret)
- Kollisionsüberwachung aktivieren
- Eingabewert für Toleranz
- Achsrichtung Linearachse
- Flexibilität in Achsrichtung (linear)
- Vorschauwert im Editor
- Achsrichtung Rotationsachse
- Flexibilität in Achsrichtung (rotatorisch)

Beispielhafte Einstellung der Achsflexibilität einer Linearachse mit dem Plugin

The two screenshots show the same 3D model of a mechanical assembly. The left screenshot shows the 'PreviewValue' set to 0, and the right screenshot shows it set to 1. A double-headed arrow indicates the transition between the two states.

Vorschauwert auf 0 eingestellt

Vorschauwert auf 1 eingestellt

Bild 5.20: Kinematikdefinition in Unreal Studio mit dem entwickelten Plugin

Definition of Kinematics in Unreal Studio with the Developed Plugin

Wurden die Freiheitsgrade der Betriebsmittelbaugruppen in einem Kinematikmodell hinterlegt, können die Fähigkeitsparameter als Erweiterung der Klassifizierung im Datenmodell angegeben werden. Hier kann beispielsweise der mögliche Drehmomentbereich einer Schraubspindel oder die Stationskapazität nach MÜLLER ET AL. [MÜLL17] angegeben werden.

5.4.2 Automatisierte Erfassung von Produktanforderungen

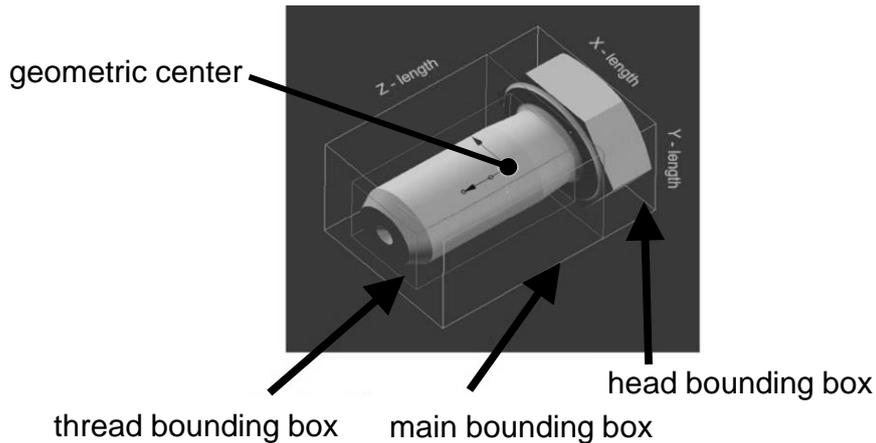
Automated Capturing of Product Requirements

Zur automatisierten Erfassung der Produktanforderungen wird wie in der Forschungslücke gefordert das Feature Engineering in Form der FS-IFT-Methode eingesetzt (Kapitel 3.4.2). Am Beispiel des entwickelten Feature Engineering Algorithmus für Schraubverbindungen werden zwei mögliche Herangehensweisen beschrieben.

In Kapitel 3.4.2 wurde bereits dargelegt, dass jede Geometrie eines CAD-Modells in einer Parameterform beschrieben werden kann. Diese Eigenschaft wird an dieser Stelle genutzt. Es wird zunächst ein Set an Features, also Geometrieelementen, ausgewählt. Die Features werden durch die Feature Transformation zu repräsentativen, interpretierbaren Kombinationen verbunden.

Zur Beschreibung einer Schraube müssen zunächst Trainingsdaten erzeugt werden. Dies erfolgt durch die Zusammenstellung von bekannten CAD-Modellen von Schrauben. Zu jeder CAD-Schraube aus dem Trainingsdatenset werden zunächst sämtliche Außenmaße aufgenommen. Daraus wird die sogenannte ‚main bounding box‘ errechnet. Anschließend wird der Massenschwerpunkt ermittelt. In einem tesselierten Dreiecksmodell kann nun die Seite des Schraubenmodells mit der größeren Dichte an Punkten (Vertices) bestimmt werden. Auf dieser Seite befindet sich der Schraubkopf. Nun können die Features zur Beschreibung des Bauteils ermittelt werden. Neben den bereits ermittelten Außenmaßen für die main bounding box, werden die Länge und Breite des Schraubkopfes (head bounding box) und des Gewindes (thread bounding box) aufgenommen. Zum automatischen Erkennen einer Schraube in einem CAD-Produktmodell muss nun das Feature Set für jedes Bauteil aus dem Produktmodell berechnet werden.

Liegt die main bounding box zwischen allen bekannten Schrauben aus dem Trainingsdatenset, handelt es sich potentiell um eine Schraube und die Features werden weiter kombiniert. Es werden die Quotienten aus den Seitenlängen des Kopfes, aus den Seitenlängen des Gewindes und aus den Seitenlängen des Kopfes zu den Seitenlängen des Gewindes ermittelt. Weichen diese weniger als 2 % von einem bekannten Trainingsdatensatz ab, handelt es sich bei dem Bauteilmodell um eine Schraube. Entsprechen die ermittelten Features in separierter und kombinierter Form exakt den Features eines Trainingsdatensets, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um den exakt gleichen Schraubentyp handelt. Wurde erkannt, dass es sich um eine Schraube handelt, kann das Zentrum des Schraubkopfes ermittelt werden. Dieser stellt die Schnittstelle zur Schraubspindel dar. Bild 5.21 zeigt die Übersicht über die separierten und kombinierten Features zum Finden einer Schraube.



Algorithmus zur Feature-Berechnung

1. Ausgangspunkt: Schraube als tesseliertes Modell (Dreiecksdarstellung)
2. Bilde die „main bounding box“
3. Finde das „geometric center“ (Massenschwerpunkt)
4. Ermittle die Seite mit der größeren Dichte von Punkten (Vertices) = Schraubkopf
5. Ermittle die Features

Feature Set zur Beschreibung einer Schraube

- total_length
- total_side
- head_length
- head_side
- thread_length
- thread_side

Algorithmus zum Finden einer Schraube

1. Liegt die „main bounding box“ zwischen allen bekannten Schrauben?
2. Berechnung der Längenverhältnisse und Vergleich mit Datenbank

Feature Set zum Finden einer Schraube

- head_length_fraction (X:Y)
- thread_length_fraction (X:Y)
- head_length_over_thread_length (Y:Y / X:X)

Bild 5.21: Feature Engineering Algorithmus zur Erkennung von Schrauben

Feature Engineering Algorithm for the Detection of Screws

Eine weitere Alternative ist der featurebasierte Vergleich von virtuell erzeugten Bildern. Dies bietet sich insbesondere für kompliziertere Geometrien an. Soll für die Schraube beispielsweise automatisch ermittelt werden, welcher Schraubkopftyp vorliegt, kann wie in Bild 5.22 vorgegangen werden. Nachdem ermittelt wurde, dass es sich um eine Schraube handelt, kann virtuell ein Schnitt durch den Schraubkopf gezogen werden. Dieser Schnitt kann nun wie ein Bild verarbeitet werden. Es wird zunächst ein Graustufenbild von dem Schraubkopftyp erzeugt. So kann die Kante des Kopfes ermittelt werden. Nun wird diese Kante, die zentrisch immer geschlossen sein muss, zerschnitten und in lineare Form gebracht. Diese lineare Darstellung kann nun als Signal verarbeitet werden. Die Veränderung der Höhe und Tiefe der Kurve kann aufgezeichnet werden. Das Verhältnis aus Höhe der Signalspitzen, Abstand der Signalspitzen und Veränderung der Steigung der Kurve (zweite mathematische Ableitung) stellt die kombinierten Features dar. Diese können mit Trainingsdaten verglichen werden. So kann aus dem virtuellen zweidimensionalen Bild beispielsweise erkannt werden, ob es sich um einen M6- oder M8-Schraubkopf mit Sechskant- oder Torx-Schraubkopf handelt.

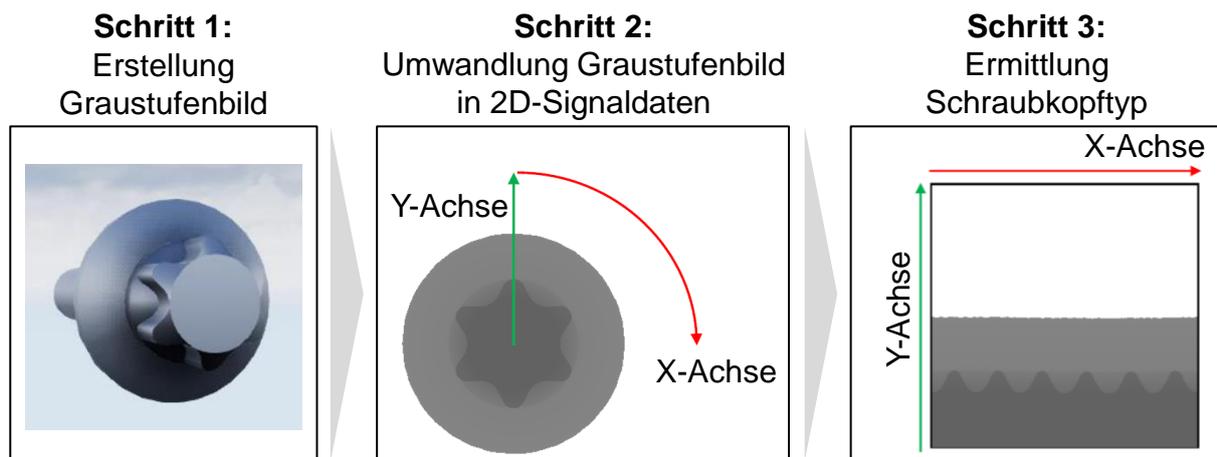


Bild 5.22: Schritte zur automatisierten Ermittlung des Schraubenkopftyps

Steps for the Automated Detection of the Type of Screw Head

Aus den beiden Beispielen ist ersichtlich, dass wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben für die effiziente Erkennung ähnlicher Bauteile die Vorleistung der Definition repräsentativer Features entscheidend ist. Hier wird einmalig tiefes Experten-Know-How benötigt. Es empfiehlt sich zudem durch Testanwendungen die Featuredefinition vor der Umsetzung in einer serienmäßig genutzten Anwendung zu optimieren. Anschließend kann die Qualität der Ergebnisse des Algorithmus durch Anreicherung der Trainingsdaten immer weiter verbessert werden. Neben der Festlegung positiver Muster kann auch durch Training von negativen Mustern die Auswertungsqualität verbessert werden. In dem Beispiel der Schrauben bedeutet dies, dass bei den Trainingsdaten auch Bauteile hinterlegt werden müssen, die keine Schrauben sind. So lernt der Feature Engineering Algorithmus die unterschiedlichen Längenverhältnisse von Schrauben und anderen Bauteilen klar voneinander abzugrenzen.

Um die automatisierte Anforderungserkennung zu ermöglichen, muss das Datenmodell aus Kapitel 5.1.2 um die Featuredatenbank und die Trainingsdaten erweitert werden. Diese müssen mit dem Objekt Montageprozess typ verknüpft sein.

5.4.3 Dreistufiger Abgleich von Anforderungen und Fähigkeiten und Ergebnis

Three-Step Comparison of Requirements and Capabilities and Result

Sind nun die Fähigkeiten in Form von Parametern oder Simulationsmodellen definiert und die Anforderungen automatisiert erkannt worden, kann der Abgleich der Anforderungen und Fähigkeiten gestartet werden. Wie in der Forschungslücke gefordert, stellt dieser eine Kombination aus simulativer Prüfung und Parameterabgleich dar. Prozessübergreifend werden standardisierte Prüfvorgaben definiert, die zu erfüllen sind. Der standardisierte Prüfprozess gliedert sich in die drei Stufen:

- Erreichbarkeitsprüfung,
- Zugänglichkeitsprüfung und

- Eignungsprüfung des Endeffektors.

Anhand dieser drei Stufen kann für jeden Montageprozesstypen die Erfüllung der Produktanforderungen durch das Betriebsmittel analysiert werden. Die beiden ersten Stufen werden analog zu der Erreichbarkeits- und Kollisionsprüfung nach BRACHT ET AL. mittels der Simulationsmodelle überprüft [BRAC18, S. 296–297]. Die Zugänglichkeit des Produktmerkmals kann über Kollisionsuntersuchungen ermittelt werden [WACK10, S. 49]. Die Eignungsprüfung des Endeffektors erfolgt ergänzend dazu über den Abgleich von Parametern. Es kann beispielweise geprüft werden, ob die passende Schraubennuss zum konstruierten Schraubkopftyp vorliegt [vgl. WACK10, S. 49].

Erreichbarkeitsprüfung

Die Erreichbarkeit einer Produktanforderung ist gegeben, wenn der Soll-Angriffspunkt eines Endeffektors am Bauteil im Bewegungsraum des Endeffektors liegt. Dieser Soll-Angriffspunkt muss in der korrekten Position und Lage durch den Endeffektor erreicht werden können. In dem Beispiel in Bild 5.23 ist die Erreichbarkeit gegeben.

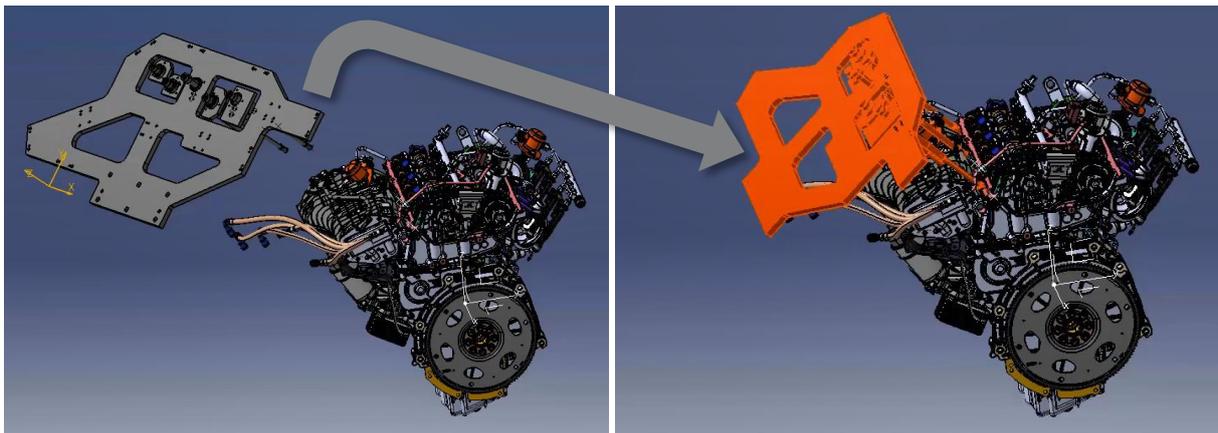


Bild 5.23: Bewegungssimulation des Betriebsmittels bei der Erreichbarkeitsprüfung

Movement Simulation of the Resource During the Accessibility Check

Wie oben beschrieben wird die Erreichbarkeit simulativ geprüft. Hierzu wird der in Bild 5.24 am Beispiel einer Schraubverbindung dargestellte Algorithmus abgearbeitet. Für jeden zu erreichenden Punkt am Bauteil wird jeder Endeffektor des betrachteten Betriebsmittels ausgewählt, der in der Lage ist, den geforderten Montageprozesstypen auszuführen.

Für jeden dieser Endeffektoren wird die Variable `total_movement_costi` zunächst auf den Wert Null gesetzt. Beginnend auf der höchsten Hierarchieebene (in der Regel der Bewegungsbaugruppe) über dem betrachteten Endeffektor wird nun für jede hierarchisch übergeordnete Baugruppe und den Endeffektor selbst folgende Prozedur durchlaufen:

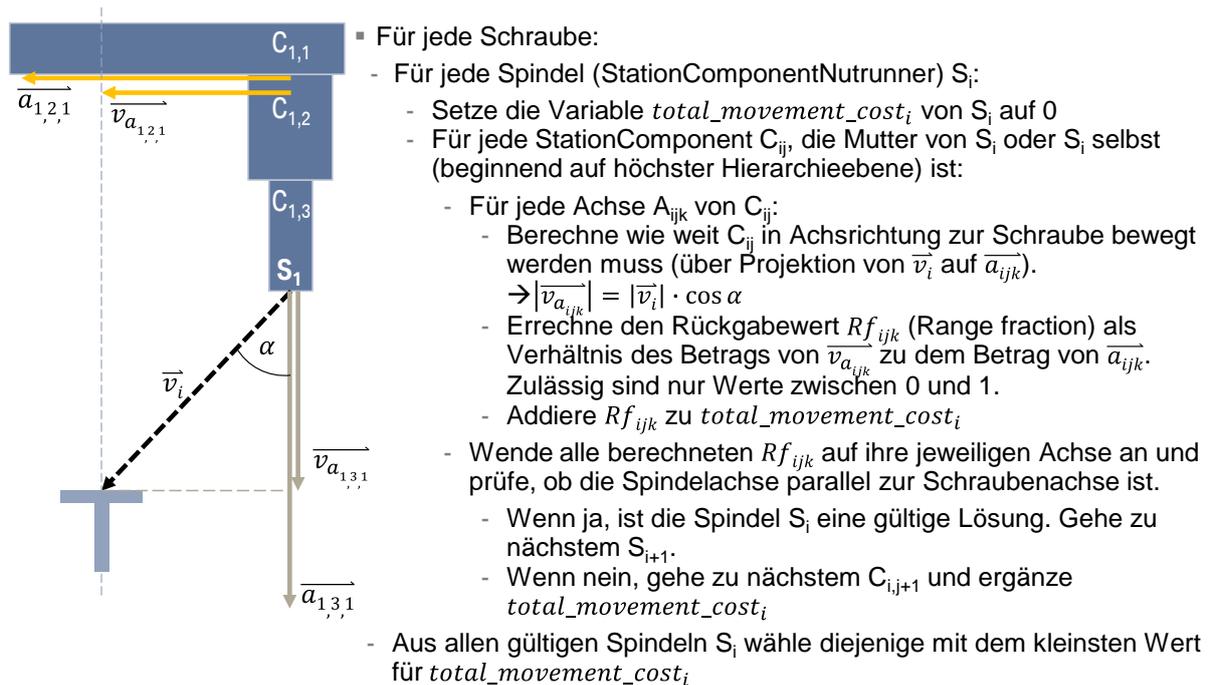


Bild 5.24: Algorithmus für die Erreichbarkeitsprüfung

Algorithm for the Accessibility Check

Zunächst wird für jede Achse der betrachteten Baugruppe die Projektion des Abstandsvektors von der Endeffektorspitze zum Angriffspunkt am Bauteil auf den Achsvektor berechnet. Von dieser Projektion wird der Betrag berechnet, sodass bekannt ist, wie weit die Baugruppe auf der Achse verfahren werden müsste, um auf gleicher Höhe wie der Angriffspunkt am Bauteil zu stehen. Nun wird der Rückgabewert $range_fraction$ als Verhältnis des ermittelten Betrages zu dem Betrag des Achsvektors der möglichen Verstellungslänge in Achsrichtung berechnet. Ist dieses Verhältnis größer als eins kann der Angriffspunkt am Bauteil nicht mit einer reinen Verstellung der betrachteten Achse erreicht werden. Werte kleiner als Null können nicht entstehen, da die Richtung des Achsvektors und des Verstellungsvektors gleich sein müssen. Der Wert für die Variable $range_fraction$ wird nun zu der Variable $total_movement_cost_i$ hinzuaddiert.

Nun wird jede Achse der betrachteten Baugruppe um den Anteil $range_fraction$ der möglichen Verstellung verschoben. Stimmt die Position und Richtung der Endeffektorspitze mit der Position und Richtung des Angriffspunktes am Bauteil überein, ist dieser durch diesen Endeffektor erreichbar. Dafür müssen die Achsen der Baugruppe jeweils um ihren Anteil $range_fraction$ verschoben werden. Stimmen Position und Richtung nicht überein, müssen schrittweise die $range_fraction$ -Werte für die Achsen der untergeordneten Baugruppen ermittelt werden. Dadurch wird die $total_movement_cost_i$ erhöht. Dies wird so lange wiederholt, bis der Angriffspunkt und die Richtung erreichbar sind, oder die Verstellung des Endeffektors und aller übergeordneten Baugruppen ausgereizt wurden, ohne dass der Angriffspunkt erreichbar ist.

So können alle Endeffektoren ermittelt werden, mit denen der Angriffspunkt am Bauteil erreichbar ist. Der Endeffektor mit dem geringsten Wert für die $total_movement_cost_i$ ist der Endeffektor, mit dem bei der geringsten Verstellung der Achsen der Angriffspunkt am Bauteil erreicht werden kann.

Ist nun ein Endeffektor ausgewählt, wird die nächste Schraube ausgewählt, alle $range_fraction$ Werte der Baugruppen werden fixiert, die mit dem vorherigen Endeffektor gleich sind und der Algorithmus für die hierarchisch darunter liegenden Baugruppen wird erneut durchgeführt. Gibt es keine Lösung wird der Endeffektor für den ersten Angriffspunkt gewählt, der den nächsthöheren Wert für die $total_movement_cost_i$ hat. Gibt es hier eine Lösung, können mehrere Endeffektoren zeitgleich unterschiedliche Angriffspunkte am Bauteil erreichen.

Wird keine Lösung gefunden, bei der die für unterschiedliche Endeffektoren kommunalen übergeordneten Baugruppen einheitlich verstellt werden müssen, können die unterschiedlichen Angriffspunkte am Bauteil nicht zeitgleich erreicht werden. In diesem Fall muss die Fixierung der $range_fraction$ -Werte für die übergeordneten Baugruppen aufgelöst werden. Anschließend kann eine mögliche Lösung ermittelt werden.

Mit diesem Vorgehen lassen sich die effizientesten Verstellmöglichkeiten für alle Achsen des Betriebsmittels errechnen, die zum Erreichen der Angriffspunkte am Bauteil erforderlich sind. Gibt es für einzelne Angriffspunkte keine Lösung, sind diese nicht erreichbar. Damit ist das Produkt auf dem betrachteten Betriebsmittel nicht baubar.

Wurden gültige Endeffektoren für einen Angriffspunkt am Bauteil ermittelt, wird das Geometriemodell des kompletten Betriebsmittels in der Simulationsszene anhand der ermittelten $range_fraction$ -Werte verstellt. Das Produktmodell wird im geeigneten Bauzustand hinzugeladen. Nun wird eine statische Kollisionsprüfung durchgeführt. Gibt es eine Kollision zwischen Produktmodell und Betriebsmittelmodell, ist die errechnete Lösung ungültig. Nur, wenn hier gültige Lösungen überbleiben, ist das Produkt mit dem betrachteten Betriebsmittel tatsächlich erreichbar. In allen anderen Fällen ist das Produkt mit diesem Betriebsmittel nicht baubar.

Zugänglichkeitsprüfung

Ist die Erreichbarkeit gegeben, kann im nächsten Schritt für jede gültige Lösung aus der Erreichbarkeitsprüfung die Zugänglichkeit überprüft werden. Hierzu muss zunächst ein Standardparameter definiert werden. Dieser gibt an, welche Verfahrestrecke generisch angenommen wird. Diese muss in Relation zur Produktgröße definiert werden. Handelt es sich um sehr große Bauteile, kann ein größerer Wert angenommen werden, als bei sehr kleinen Bauteilen. Vereinfachend wird nun angenommen, dass die letzte Zustellung zum Angriffspunkt am Bauteil linear auf der Länge der angegebenen Standardverfahrestrecke erfolgt.

Anschließend wird mit dem gleichen Algorithmus wie bei der Erreichbarkeitsprüfung bestimmt, ob der Punkt, der ausgehend vom Angriffspunkt am Bauteil in Achsrichtung

des Angriffspunktes um die Standardverfahrstrecke verschoben ist, durch das Betriebsmittel erreichbar ist. Dieser Punkt wird als Startpunkt der Zustellung definiert. Ist dieser nicht erreichbar, ist der Angriffspunkt am Bauteil nicht zugänglich. Ist er erreichbar, wird der Endeffektor auf den Startpunkt der Zustellung eingestellt. Von dort wird nun die Zustellung dynamisch simuliert. Währenddessen wird eine Kollisionsüberwachung zwischen Betriebsmittel und Produkt aktiviert. Wird eine Kollision gefunden, ist die Zugänglichkeit nicht gegeben.

In der Regel reicht die Annahme der linearen Zustellung (z. B. bei den Montageprozessstypen Schrauben und Stecken). Bei einigen Montageprozessstypen muss jedoch für die Zugänglichkeit ein Sonderprozess definiert werden. Dies ist zum Beispiel beim Greifen der Fall. Hier muss vor der linearen Zustellung zunächst die Öffnung des Greifers simuliert werden. Die Zugänglichkeitsprüfung erfolgt dann mit geöffnetem Greifer.

Neben der Zustellung ist für die Zugänglichkeitsprüfung auch eine Toleranzanalyse erforderlich. Durch Effekte wie Fertigungstoleranzen, Gravitation und dehn- und stauchbare Materialien ist die Annahme der exakten konstruierten Geometrie des Betriebsmittels nicht ausreichend. Deshalb muss neben der Kollisionsprüfung mit dem CAD-Modell des Betriebsmittels auch die Kollision des Produktmodells mit einem Toleranzaufschlag untersucht werden. Dies wird im Folgenden anhand einer Schraubspindel erläutert. Die Schraubspindel arbeitet in horizontaler Richtung. Deshalb wirkt auf die Spitze der Schraubspindel die Gravitationskraft. Zudem ist die Lagerung der Schraubnuss nicht vollkommen fixiert. Um diese Toleranzen auszugleichen werden auf die Geometrie des Endeffektors 1,5 mm im Radius aufgeschlagen. Die sich daraus ergebende Hüllkurve um die Schraubnuss wird als eigenes Kollisionsmodell in der Simulation mitgeführt (Bild 5.25). So kann es vorkommen, dass mit der eigentlichen Schraubergeometrie keine Kollision gefunden wird, dass aber das Toleranzmodell mit dem Produktmodell kollidiert. In diesem Fall ist die Zugänglichkeit zwar gegeben, sie wird aber als kritisch markiert. Wird weder eine Kollision mit der Endeffektorgeometrie noch mit der Toleranzgeometrie gefunden, ist die Zugänglichkeit gegeben. Damit ist die Lösung aus der Erreichbarkeitsprüfung weiterhin eine gültige Lösung.

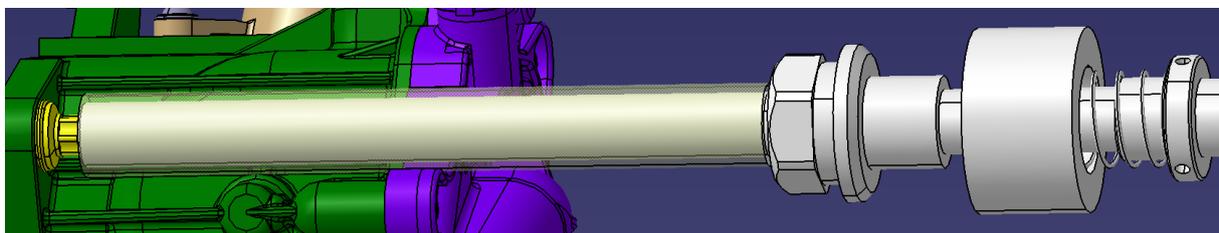


Bild 5.25: Transparente Zylinder als Toleranzbereiche bei Schraubspindeln

Transparent Cylinders as Tolerance Area of Screw Spindles

Das Ergebnis der Simulation kann folglich in Form von zwei Parametern zurückgegeben werden. Die Erreichbarkeit durch einen Endeffektor kann als boolescher Wert gegeben sein, oder nicht gegeben sein. Die Zugänglichkeit kann gegeben sein, kann

durch eine Toleranzkollision eingeschränkt gegeben sein oder kann nicht gegeben sein. Diese Werte können in dem Datenmodell gespeichert werden.

Eignungsprüfung des Endeffektors

Die dritte Stufe der Überprüfung dient zur Prüfung der Eignung des Endeffektors für die Bauteilgeometrie (Anforderung). Die bei der Klassifizierung der Montageprozess-typen definierten Fähigkeitsparameter müssen überprüft werden. Dies erfolgt analog der Lösung bei MÜLLER ET AL. [MÜLL15]. Es werden Eigenschaften in einer Datenbank zwischen Produkt und Betriebsmittel verglichen. Zum Beispiel kann in einem Greifprozess die Masse des Bauteils mit der Tragfähigkeit des Greifers verglichen werden. Tritt ein Fähigkeitsparameter bei mehreren Montageprozess-typen auf oder ist in dem betrachteten Montagesystem der Montageprozess-typ sehr häufig im Einsatz, kann eine weitere Automatisierung in Betracht gezogen werden. Ein Beispiel dazu ist die automatische Ermittlung des Schraubkopftypes wie in Kapitel 5.4.2 beschrieben. Dies kann auch auf die Betriebsmittelseite angewendet werden. Hier kann die Schrauberrnuss mittels eines virtuellen Bildes aufgenommen werden, die Kontrastkontur mittels Signalverarbeitungs-algorithmen ausgelesen werden und somit die Passung aus Schrauberrnuss und Schraubkopf berechnet werden. Solche automatischen Abgleiche auf Basis des CAD-Modells funktionieren nur für geometrische Parameter. Für eine über die geometrische Absicherung hinausgehende Analyse der Baubarkeit (z. B. Drehmoment) müssen anderweitige Datenquellen herangezogen werden. Denkbar ist hier eine parametrische Hinterlegung der Fähigkeiten im Fähigkeiten-Visualisierungsmodell (vgl. Kapitel 5.3). Dies wird in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet.

Nur, wenn der Abgleich für alle Fähigkeitsparameter positiv ist und die Erreichbarkeit und Zugänglichkeit ebenfalls gegeben sind, ist der Bauteilart-Prozess mit dem untersuchten Betriebsmittel durchführbar. Sind alle Bauteilart-Prozesse mit einem bestehenden Betriebsmittel durchführbar, ist das Bauteil baubar. Um die Baubarkeit des gesamten Produktes zu erreichen, müssen sämtliche Bauteile baubar sein.

Sind einzelne Toleranzbereiche bei der Zugänglichkeitsprüfung verletzt, muss für diese Fälle eine manuelle Expertenschätzung durchgeführt werden. Hier ist zu untersuchen, ob es aufgrund der Toleranzverletzung zu einer Nicht-Baubarkeit kommt. Der Entscheidungsbaum für die Ermittlung der Baubarkeit ist in Bild 5.26 aufgeführt.

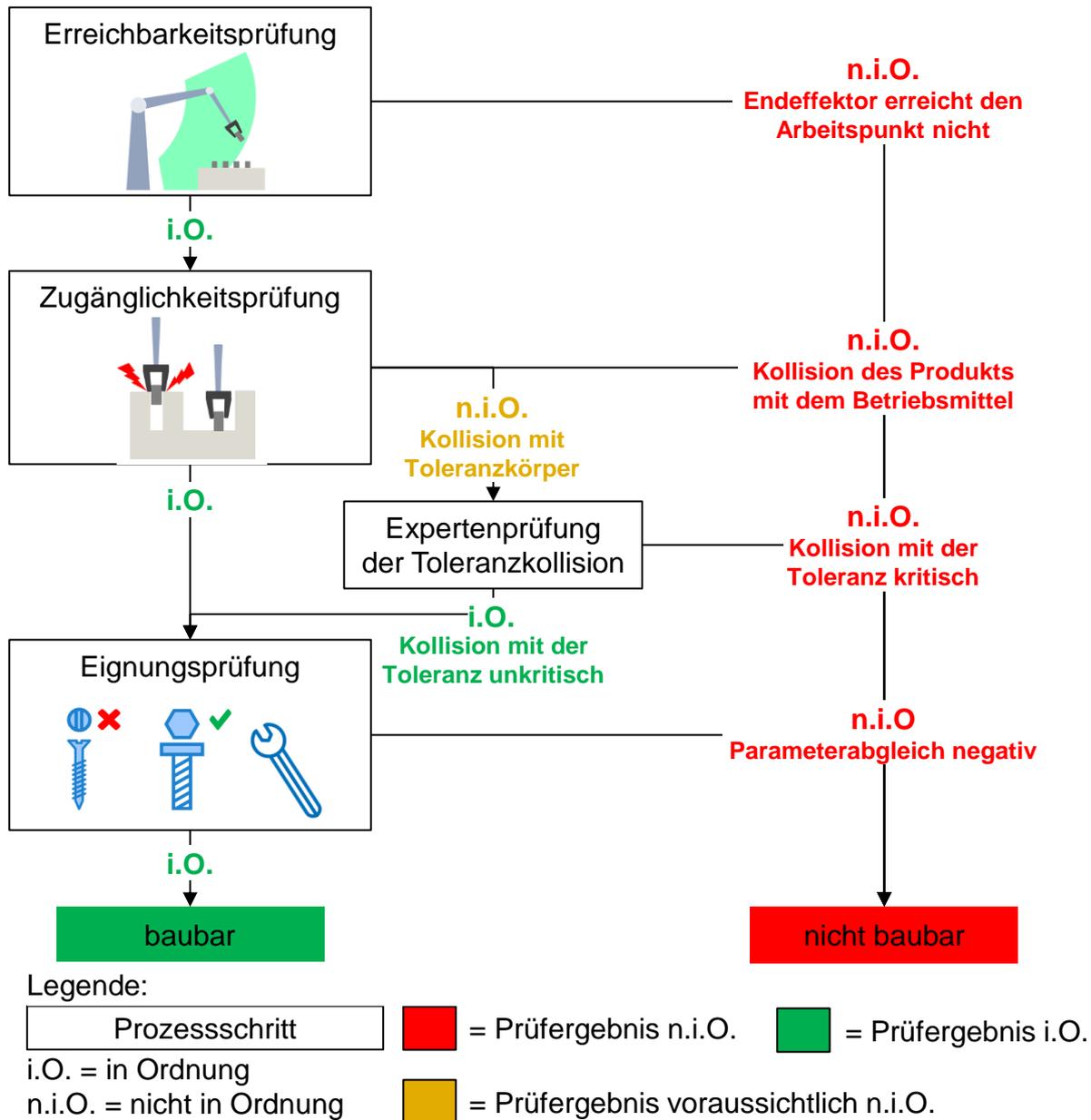


Bild 5.26: Entscheidungsbaum für die Baubarkeitsprüfung

Decision Tree for the Assembly Check

5.4.4 Entscheidungsgrundlage

Decision Basis

Wurde die Baubarkeitsprüfung abgeschlossen, müssen die Ergebnisse aufbereitet werden, um den Montageplanern eine schnelle Identifikation der Baubarkeitskonflikte zu ermöglichen. Aufbauend auf den Ergebnissen kann einer der Stellhebel nach MÜLLER ET AL. [MÜLL15] gewählt werden. Bei der Ergebnisaufbereitung der Baubarkeitsprüfung wird sich an den Darstellungsmöglichkeiten nach MÜLLER ET AL. [MÜLL17] orientiert. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen dem Vergleich zwischen Produkt und Betriebsmittel und dem Vergleich zweier Produkte.

Sämtliche ermittelten Produkthanforderungen werden in der Produkthanforderungsdatenbank gespeichert. Diese kann als Erweiterungsmodul zum PDM-System verstanden werden. Die einzelnen Produkthanforderungen können anschließend zwischen verschiedenen Produkten verglichen werden. Dazu wird der J-Koeffizient zur Ermittlung der Kommunalität zweier Objekte verwendet (Kapitel 3.4.4). Dieser Vergleich wird anders als bei MÜLLER ET AL. [MÜLL17] auf Geometrieebene ausgeführt. Folglich lässt sich zusätzlich zur Kommunalität auf Sachnummernebene nun feststellen, ob sich diese Sachnummern auch an den montagerelevanten Merkmalen unterscheiden. Aus diesem paarweisen Vergleich zweier Produkte kann analog zur Heatmap von MÜLLER ET AL. [MÜLL17] eine Kommunalitätsmatrix erstellt werden. Deren Achsen bilden die Produkte. In dem Schnittpunkt zweier Produkte wird der Kommunalitätswert angegeben.

Zur detaillierteren Analyse muss eine Drill-down-Funktion, also eine Aufschlüsselung der Berechnung der Kommunalität, ermöglicht werden. Dort werden zum Beispiel die Schraubpositionen und erforderlichen Drehmomente der betrachteten Produkte verglichen. Dies fördert die Akzeptanz für die Anwendung der Methode durch eine bessere Nachvollziehbarkeit. Ein Beispiel für eine solche Kommunalitätsmatrix für montagerelevante Merkmale inklusive der Drill-down-Funktion ist in Bild 5.27 dargestellt.

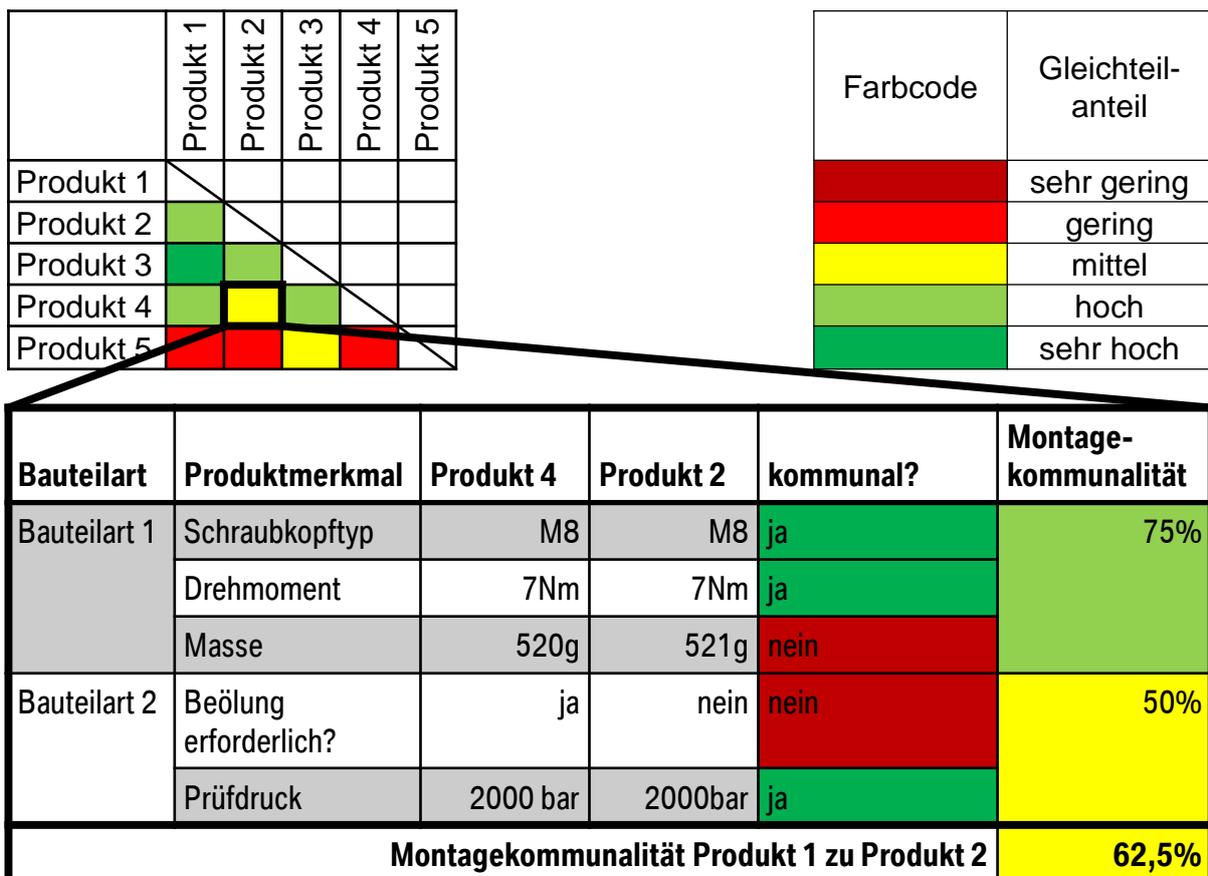


Bild 5.27: Kommunalitätsmatrix inklusive Drill-down-Funktion

Matrix of Communitiy Including Drill-Down-Function

Im zweiten Schritt wird jede Simulationsszene mit ihren Baubarkeitsprüfungsergebnissen abgespeichert. Somit kann analog zur Stationskapazitätsauswertung eine Darstellung erstellt werden, aus der die Baubarkeit der Produkte auf den Montagestationen abgelesen werden kann. Der hierzu ermittelte M-Koeffizient dient zur Ermittlung des Erfüllungsgrades der Anforderungen durch die Fähigkeiten eines Objektes. Die dafür erforderliche Matrix spannt sich auf aus der Liste der Montagestationen in der horizontalen und der Liste der Produkte in der vertikalen Achse. Durch Klick auf die Schnittfelder aus Station und Produkt kann zunächst in die zwei Baubarkeitsprüfungsdimensionen Varianten und Geometrieprüfung unterschieden werden. In der Variantendimension wird die Bewertung nach MÜLLER ET AL. dargestellt [MÜLL17]. In der Geometriedimension wird das Ergebnis der 3D-Simulation aus Kapitel 5.4.3 dargestellt. Durch Klick auf das Ergebnis der Geometrieprüfung können die Ergebnisse der drei Standardprüfungsstufen Erreichbarkeit, Zugänglichkeit und Betriebsmitteleignung angezeigt werden. Von dort können die zuvor abgespeicherten Videos der Simulationen sowie die Simulation selbst aufgerufen werden. In modernen 3D-Simulationssystemen kann auch eine Betrachtung in der virtuellen Realität (VR) ermöglicht werden. Folglich wird auch hier die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse durch eine Drill-Down-Funktion ermöglicht.

Für die Montageplanung ist die Betrachtung verschiedener Planungsszenarien hilfreich, um verschiedene Lösungspfade miteinander zu vergleichen. Sämtliche beschriebenen Auswertungsmethoden können deshalb in unterschiedlichen Szenarien betrachtet werden. Hierzu können die Stellhebel nach MÜLLER ET AL. variiert werden [MÜLL15]. Wird beispielsweise die Linienbelegung variiert, kann ermittelt werden, welche Linienbelegung die wenigsten Baubarkeitskonflikte und die geringsten Änderungskosten erzeugt. Erst durch die knappe Aufbereitung der Ergebnisse der Baubarkeitsprüfung werden diese pragmatisch nutzbar für die Montageplanung. Zugleich ist ein Drill-Down für die Detailplanung unverzichtbar.

5.5 Zusammenfassung der Methodik

Summary of the Methodology

Aufbauend auf Bild 4.1 (S. 80) wurde in Kapitel 5 der Aufbau der einzelnen Bausteine erläutert. Bild 5.28 (S. 130) zeigt die prozessualen Zusammenhänge der einzelnen Bausteine. Auf der Seite des Produktes wird im Entwicklungsprozess aus Unternehmenszielen und Marktanforderungen ein Produktkonzept erstellt. Bei der Erstellung der Produktkonzepte werden die aus den Rekonfigurationsräumen abgeleiteten Anforderungen berücksichtigt, um von Beginn an die grundlegende Baubarkeit sicherzustellen. Die Rekonfigurationsräume werden für besonders unflexible Betriebsmittel unter Berücksichtigung der strategischen Unternehmensziele und der Wahrscheinlichkeit von Bauteiländerungen definiert (Kapitel 5.2).

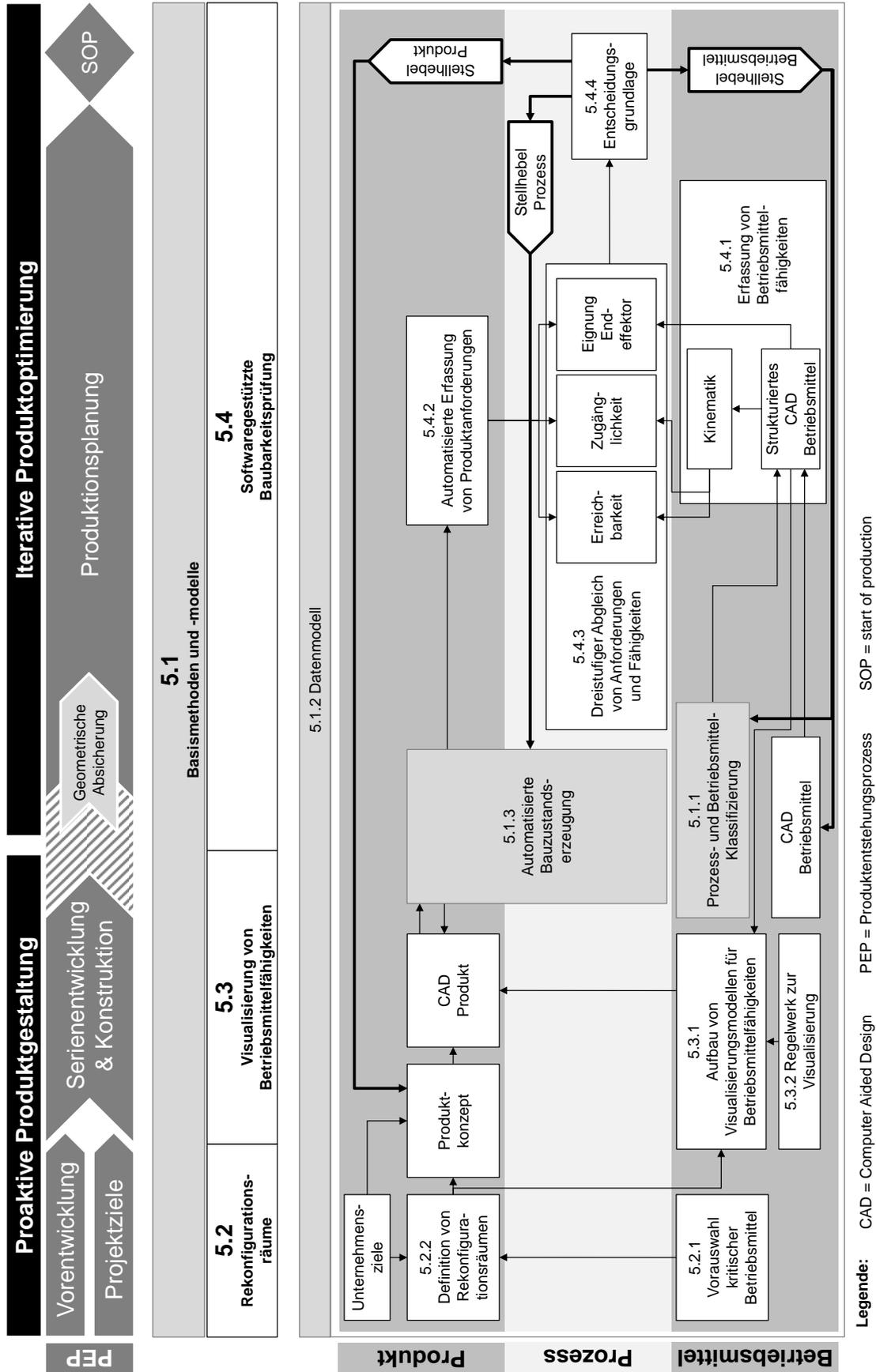


Bild 5.28: Zusammenspiel der Methoden und Modelle

Interdependency of the Methods and Models

Das Produktkonzept wird in einem CAD-Produktmodell verfeinert. Der Bauteilkonstrukteur kann die beiden Bausteine Visualisierungsmodell und Bauzustand nutzen, um bereits im Entwicklungsprozess die Baubarkeit seines Bauteils abzusichern. Das Visualisierungsmodell des Betriebsmittels basiert auf dem strukturierten CAD-Modell des Betriebsmittels. Dieses wird gemäß der in Kapitel 5.1.1 dargestellten Klassifizierung der Betriebsmittelfähigkeiten in die drei kinematischen Baugruppen Bewegungsbaugruppe, Prozessbaugruppe und Endeffektor eingeteilt. Für das Visualisierungsmodell der Betriebsmittelfähigkeiten werden den einzelnen Baugruppen produktrelevante Informationen angefügt (Kapitel 5.3).

Mit dem Bauzustandsmodell wird automatisiert der Bauzustand eines Produktes aus bekannten Verbauorten abgeleitet. Damit lassen sich Montagereihenfolgen in unterschiedlichen Montagelinien absichern (Kapitel 5.1.3).

In Kapitel 5.4 wird beschrieben, wie mittels Feature Engineering die Produkthanforderungen aus dem Produktmodell mit dem korrekten Bauzustand automatisiert extrahiert werden können. Alternativ können diese manuell ergänzt werden. Die bekannten Produkthanforderungen werden in einer dreidimensionalen Simulation in einem dreistufigen Prozess abgesichert. Betriebsmittelseitig ist dafür die Erstellung eines Kinematikmodells aus dem strukturierten CAD-Modell des Betriebsmittels erforderlich. Dieses wird für die Berechnung der Erreichbarkeit einer Produkthanforderung und die Zugänglichkeitsprüfung verwendet. Zudem dient das strukturierte CAD-Modell des Betriebsmittels als Eingangsgröße für die Eignungsprüfung des Betriebsmittels. Die Baubarkeitsprüfungsergebnisse werden in standardisierter Form aufbereitet. Für verschiedene Planungsszenarien wird ein Abgleich zwischen Produkt und Betriebsmittel und zwischen verschiedenen Produkten durchgeführt. Diese Auswertungen dienen als Entscheidungsgrundlage für die Montageplanung, welcher der drei Stellhebel der Montageplanung nach MÜLLER ET AL. [MÜLL15] angewendet werden soll, um das Planungsszenario zu optimieren.

Wird der Stellhebel Prozess gewählt, führt dies zu einer Veränderung der Montagereihenfolge oder der Linienbelegung. Somit ändert sich der Bauzustand des Produktes in der Regel. Deshalb muss in diesem Fall der Bauzustand erneut ermittelt werden und die softwaregestützte Baubarkeitsprüfung erneut durchgeführt werden.

Wird sich für eine Änderung des Produktes entschieden, ändert sich das Produktkonzept und folglich das CAD-Modell des Produktes. Bei der Anpassung des Produktkonzeptes empfiehlt sich eine Berücksichtigung der Rekonfigurationsräume, um eine bessere Baubarkeit sicherzustellen. Auch in diesem Fall muss der Bauzustand neu erzeugt werden und eine neue Simulation gestartet werden.

Wird als Stellhebel die Anpassung des Betriebsmittels gewählt, können bereits beschriebene Rekonfigurationsräume Anwendung finden, oder neue Betriebsmittelkonzepte entwickelt werden. Das neue Betriebsmittelkonzept muss als CAD-Modell dargestellt werden und in die Klassifizierung der Betriebsmittelfähigkeiten eingeordnet

werden. Damit wird eine Überarbeitung des Visualisierungsmodells erforderlich und das Kinematikmodell muss aktualisiert werden, sodass diese für zukünftige Untersuchungen bereitstehen. Die Baubarkeitsprüfung muss zudem für alle bereits vorhandenen Produkte durchgeführt werden. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades ist dies im Vergleich zum üblicherweise stark manuellen Vorgehen der Baubarkeitsprüfung mit geringem Aufwand möglich.

6 Validierung in der BMW Group Motormontageplanung

Validation at BMW Group Engine Assembly Planning

Die in Kapitel 5 beschriebenen Lösungen werden in diesem Kapitel anhand eines praktischen Anwendungsbeispiels validiert. Die Ausgangssituation für den Validierungsfall wird zunächst beschrieben (Kapitel 6.1). Für den beschriebenen Validierungsfall werden in Kapitel 6.2 die Basisbausteine und in den folgenden Kapiteln die drei Lösungsbausteine angewendet. Abschließend werden die erarbeiteten Lösungen kritisch betrachtet.

6.1 Anwendungsfeld und Validierungsfälle

Area of Application and Validation Cases

In diesem Abschnitt wird zunächst die Ausgangslage in dem Anwendungsfeld für die Validierung beschrieben. Darin werden anschließend die unterschiedlichen Validierungsfälle aus der unternehmerischen Praxis vorgestellt. Abschließend wird die Softwarearchitektur erläutert mit der die Lösungsmethodik aus Kapitel 5 für die Validierung umgesetzt wurde.

Als Anwendungsfeld für die Validierung der entwickelten Lösungen wird die Montage von Verbrennungsmotoren für Personenkraftwagen bei der BMW Group gewählt. Fokus liegt dabei auf den Baukasten-Reihenmotoren. Deren Montage zeichnet sich durch hohe Stückzahlen und eine getaktete Fließmontage aus [vgl. LOTT12, S. 147–152]. Besondere Herausforderungen in der Motormontage stellen die hohe Zahl an Einzelteilen, hohe Ansprüche an die Produktionsqualität aufgrund von Sicherheitsanforderungen sowie eine sehr dynamische Bauteilentwicklung (vgl. Kapitel 1) dar. Im Vergleich zur Fahrzeugmontage ist der Automatisierungsgrad zudem sehr hoch, wodurch die Montagelösungen nur bedingt flexibel gestaltet sein können. Daraus ergibt sich eine hohe Komplexität in der Montageplanung. [vgl. KROP09, S. 10–19]

Diese wird weiter erhöht durch die Produktion der Motoren in einem weltweiten unternehmensübergreifenden und -internen Produktionsnetzwerk.

In dieser hochvernetzten Motormontage finden nahezu laufend Anläufe neuer Motoren statt. Somit handelt es sich primär um Intergationsplanungsfälle. Im Folgenden soll dies anhand von zwei Bauteilen beschrieben werden. Mit der Umstellung der initialen Baukastengeneration (TÜ0) auf die erste technische Überarbeitung (TÜ1) wurde eine Änderung des Abschlussdeckels des Motorgehäuses vorgenommen (Bild 6.1).

Die Verschraubung des Abschlussdeckels findet in allen Motorwerken mittels eines linearen Mehrfachsraubautomats statt. Dieser verschraubt zeitgleich mit 11 Schraubspindeln die 11 Schrauben des Abschlussdeckels.

Im Folgenden soll einmal das gesamte in Kapitel 5.5 beschriebene Zusammenspiel der Konzeptbausteine anhand dieses Beispielfalles simuliert werden. Dazu werden die unterschiedlichen Phasen der Produktentstehung durchlaufen und die Auswirkungen auf die beschriebenen Lösungen erläutert.

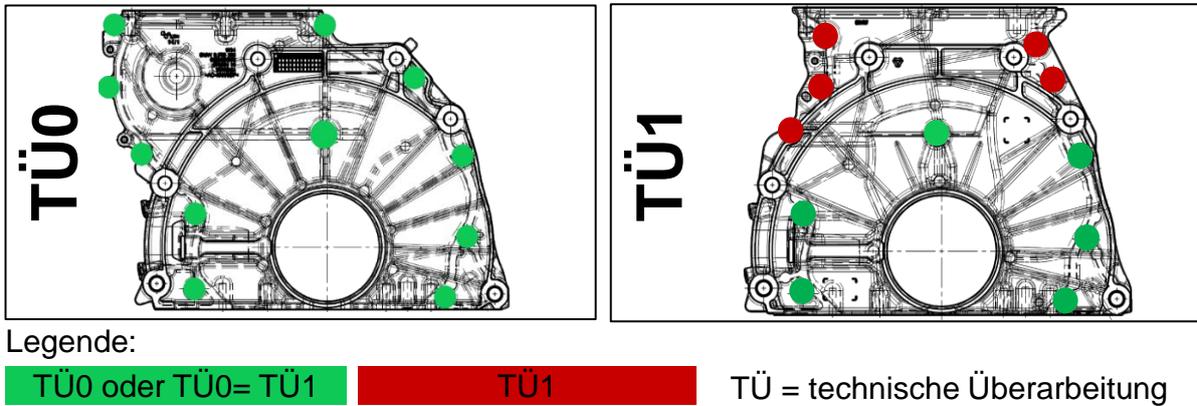


Bild 6.1: Vergleich der Abschlussdeckel aus den technischen Überarbeitungen 0 und 1

Comparison of the Engine Cover of the Technical Revision 0 and 1

In einem zweiten Validierungsfall wird die Montage des Wärmemanagementmoduls (WMM) betrachtet. Dieses wird mittels eines Zweifachschaubautomats an einem Sechssachsroboter verschraubt. Mit einer Änderung des Wärmemanagementkonzeptes im Motorraum, wurde eine Lageänderung des WMMs erforderlich (Bild 6.2).

Für den zweiten Validierungsfall werden lediglich einzelne Methoden und Modelle des Konzeptes aufgegriffen und dargestellt, um Aspekte der Lösung zu validieren, die sich mit dem ersten Validierungsfall nicht absichern lassen.

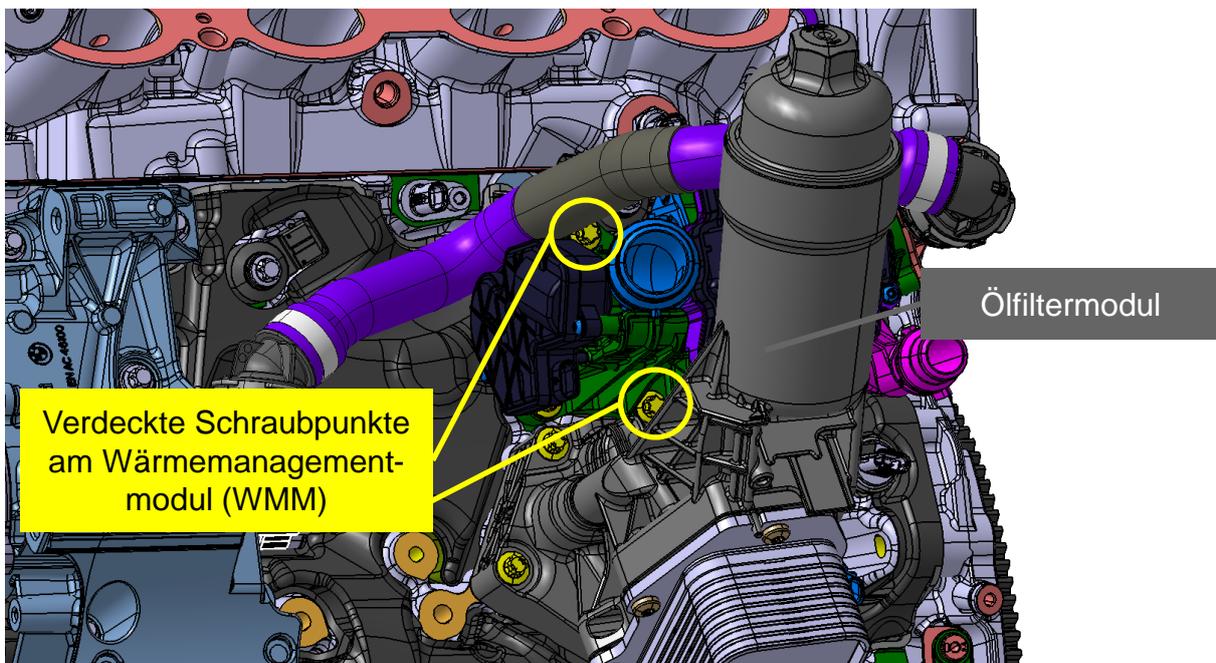


Bild 6.2: Validierungsfall des Wärmemanagementmoduls

Validation Case of the Heat Management Module

Für die Validierung wurden die entwickelten Methoden und Modelle aus Kapitel 5 in unterschiedlichen Softwarelösungen realisiert, welche in Bild 6.3 den einzelnen Lösungsbausteinen zugeordnet sind.

Im Wesentlichen kommen hier drei Umgebungen zum Einsatz: Mittels einer SQL-Datenbank werden die Zusammenhänge der einzelnen Objekte der Motormontageplanung abgebildet. Die Modellaufbereitung auf Produkt- und Betriebsmittelseite findet mittels der 3D-CAD-Konstruktionssoftware CATIA V5 statt. Teils werden dazu einzelne Funktionen wie die Herstellung des Bauzustandes mittels eigens entwickelter Softwarelösungen ergänzt. Sämtliche kinematischen Untersuchungen, also die softwaregestützte Baubarkeitsprüfung, werden mittels Unreal Studio simuliert. Diese Entwicklungsplattform aus der Computerspiele-Branche wurde gewählt, da einerseits die notwendige Kompatibilität zu CAD-Formaten gegeben ist. Andererseits ist aufgrund ihrer Open-Source-Eigenschaft eine Anpassung sämtlicher Funktionalitäten und die Erstellung eigener Softwarefunktionen möglich. Dies wird auch genutzt, um den Ablauf der Baubarkeitsprüfung in der Benutzeroberfläche darzustellen. Das entstandene Modul für die softwaregestützte Baubarkeitsprüfung wird als Assembly Check Tool – kurz ACT – bezeichnet.

An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass im Rahmen der Methodenentwicklung einzelne Softwarebausteine in anderen Entwicklungsumgebungen (z. B. CATIA Visual Basic for Applications (*.catvba)) umgesetzt wurden. Bei der Umsetzung in einem durchgängigen Softwarekonzept sind jedoch immer die zwei genannten Aspekte zu beachten: Datenkompatibilität und Offenheit der Entwicklungsumgebung.

Das Zusammenspiel der Softwarelösungen stellt sich wie folgt dar:

Die Rekonfigurationsräume werden in Microsoft Powerpoint Dateien erstellt, die in der Planungsdatenbank zu der betroffenen Bauteilart und dem Betriebsmittel verlinkt werden. Vorab findet die Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit und des Rekonfigurationsbedarfs in Microsoft Excel statt.

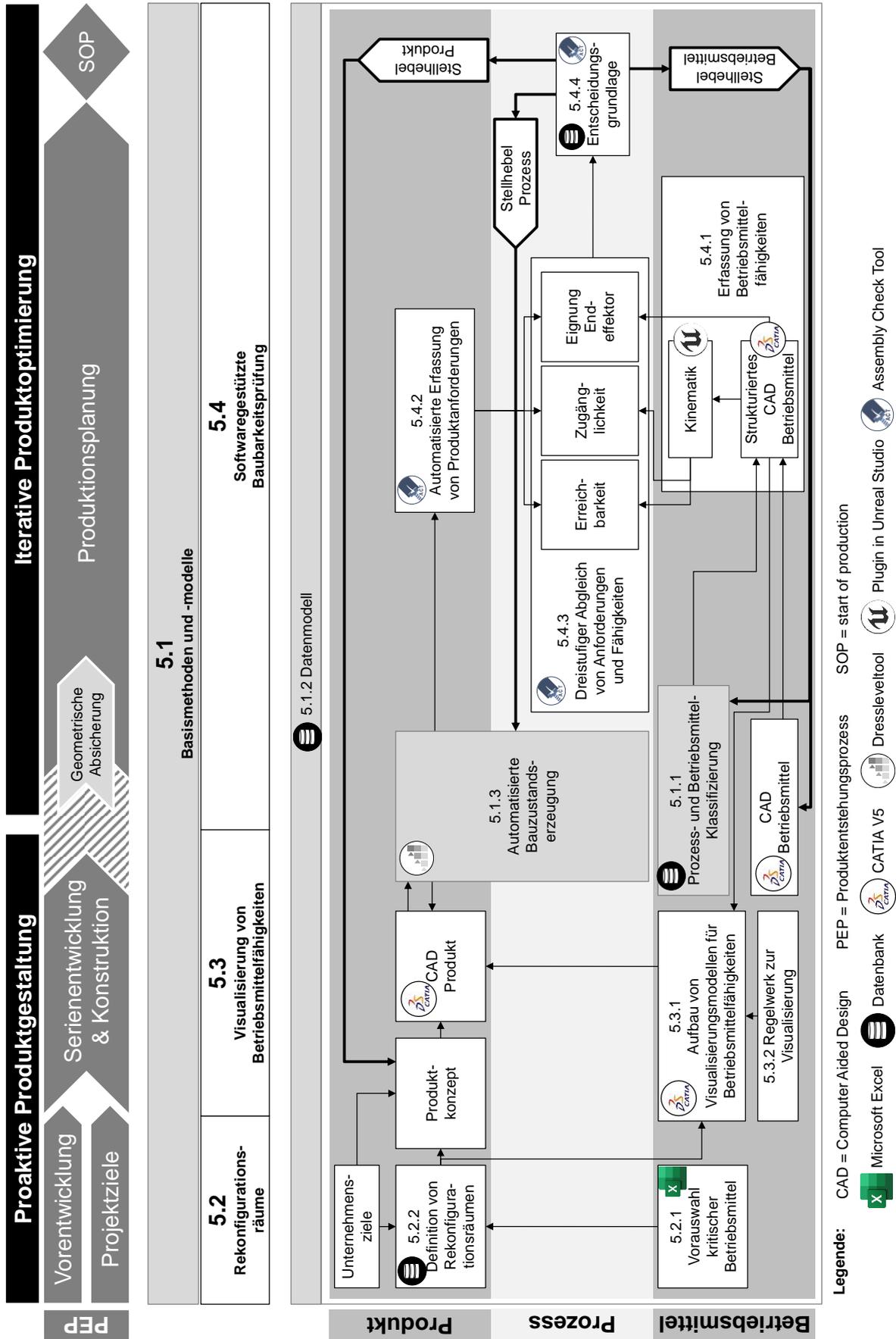


Bild 6.3: Technische Umsetzung der Methodik bei der BMW Group

Technical Realization of the Methodology at the BMW Group

Die CAD-Konstruktion der Produkte findet in CATIA V5 statt. Darauf kann das Dress-leveltool angewendet werden, mit dem automatisch der Bauzustand erzeugt wird. Die Betriebsmittelmodelle werden üblicherweise als Step-Modell geliefert. Mittels CATIA V5 werden sie in die korrekte Struktur gemäß der Prozessklassifizierung eingeteilt. Die Einteilung wird in der Planungsdatenbank gespeichert. Die aufbereiteten CAD-Modelle der Betriebsmittel werden verwendet, um die Visualisierungsmodelle der Betriebsmittelfähigkeiten zu erzeugen, die wiederum im PDM-System hinterlegt und in der Planungsdatenbank verlinkt werden. Zudem werden die strukturierten Betriebsmittelmodelle in den Editor Unreal Studio über den Konverter Datasmith importiert. In Unreal Studio wurde ein Plugin erstellt, mit dem die Kinematik zu dem Betriebsmittelmodell erstellt werden kann. Nach Fertigstellung kann das kinematisierte Betriebsmittelmodell als Package-Datei (Dateiendung *.pak) verpackt werden. Auch das Bauzustandsmodell des Motors kann mit dem Plugin in Unreal Studio in eine Packagedatei umgewandelt werden. Dabei wird ihm die Eigenschaft mitgegeben, dass es sich um ein Produktmodell handelt.

Die somit vorbereiteten Motor- und Betriebsmittelmodelle können in die Unreal Engine basierte Software ACT geladen werden. Darin werden mittels Feature Engineering die Anforderungen ausgelesen und es wird die dreistufige Baubarkeitsprüfung durchgeführt und simuliert. Das Baubarkeitsprüfungsergebnis wird als Tabelle aufbereitet und dient so als Entscheidungsgrundlage und kann in der Planungsdatenbank abgespeichert werden.

6.2 A) Validierung der Basisbausteine

Validation of the Basic Elements

In diesem Abschnitt werden die Basisbausteine validiert. Die beiden Validierungsfälle werden in die Klassifizierung eingeordnet, anhand des Datenbankmodells wird der Baubarkeitsprüfungsfall des Abschlussdeckels erläutert und die automatische Bauzustandserzeugung wird für die beiden Validierungsfälle dargelegt.

6.2.1 Klassifizierung von Montageprozessen und Betriebsmitteln

Classification of Assembly Processes and Resources

Für die Validierung der Klassifizierungsmethode (Kapitel 5.1.1) wurden nach der Zusammenstellung der Montageprozesstypen-Hierarchie aus der Literatur (Bild 5.2) gemäß Schritt 2 in Bild 5.1 sämtliche Prozesse der BMW Group Motormontage klassifiziert. Die Motormontage der BMW Group lässt sich mit 758 Bauteilart-Prozessen beschreiben. Diese 758 Bauteilart-Prozesse werden mit 19 unterschiedlichen Montageprozesstypen abgedeckt und von 4038 Endeffektoren ausgeführt. Bild 6.4 zeigt die gemäß Schritt 3 des Vorgehensmodells in Bild 5.1 angepasste Klassifizierung der Montageprozesstypen in der BMW Group Motormontage. Zu den Montageprozesstypen, die in den wissenschaftlichen Prozessmodellen (Bild 5.2) aufgeführt sind, werden das *Dichtigkeit prüfen* und das *Mechanische Funktion prüfen* ergänzt.

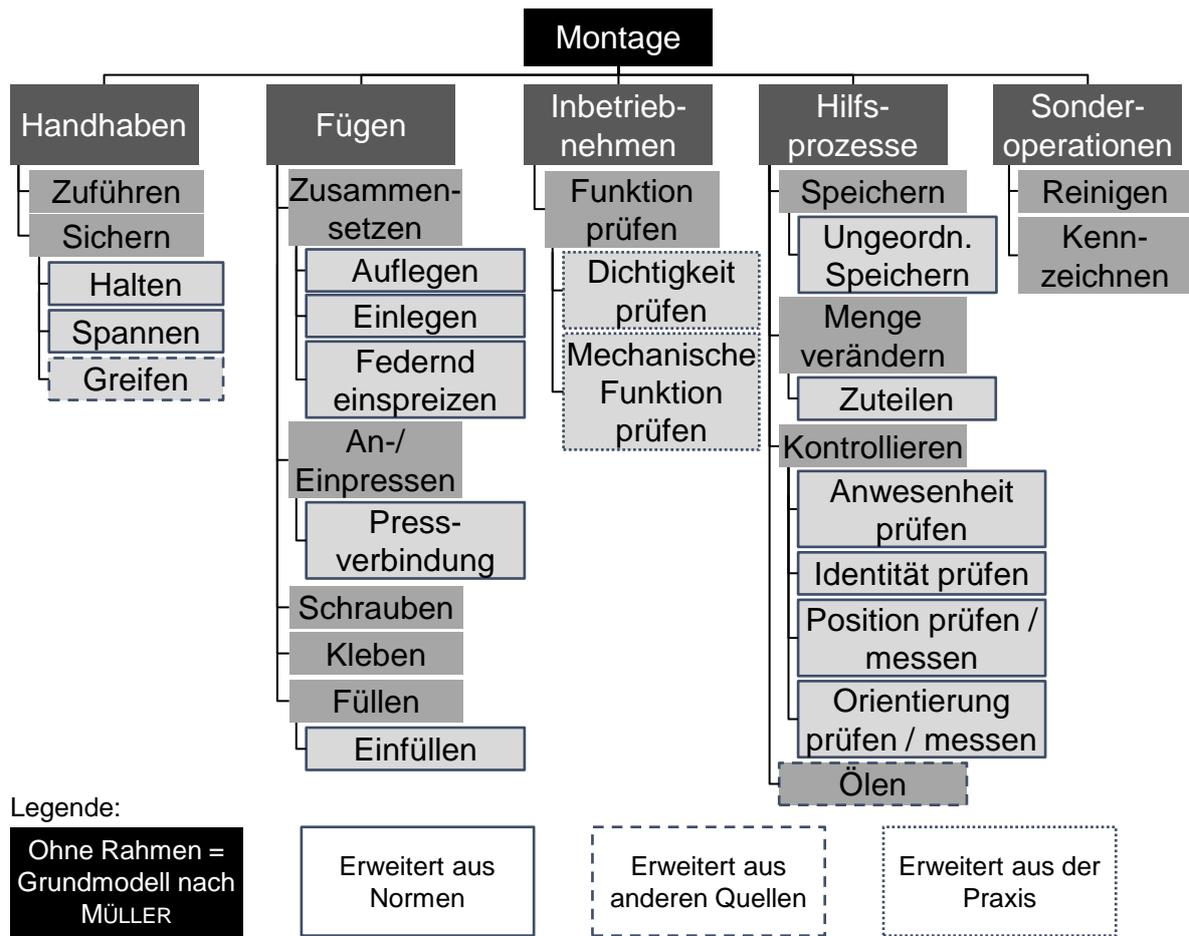


Bild 6.4: Klassifizierung der Montageprozessstypen in der BMW Group Motormontage

Classification of the Assembly Process Types in the BMW Group Engine Assembly

Einzelne Montageprozessstypen werden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Zuführen, Auflegen und Einlegen sind immer kombiniert mit dem Greifen oder Halten. Zudem soll in dieser Arbeit nicht die Absicherung der grundsätzlichen Montierbarkeit des Produktes erstellt werden, die der Prüfung des Zuführens entspricht, sondern die Baubarkeit in einem Montageprozess. Es wird davon ausgegangen, dass sich jedes Bauteil aus dem Anlieferzustand in Konstruktionslage bringen lässt. Hierzu können zudem andere Arbeiten herangezogen werden [BACK17, S. 523–524]. Das Reinigen stellt keinen typischen Montageprozessstypen dar, sondern lässt sich vielmehr in die Prozess- und Verfahrenstechnik einordnen und wird deshalb nicht weiter betrachtet. Zudem handelt es sich hierbei um die Reinigung der Werkstückträger, also keinen produktbezogenen Prozess. In Bild 6.5 ist die Häufigkeit des Auftretens der Montageprozessstypen dargestellt. Es fällt auf, dass bereits mit 6 der 16 relevanten Montageprozessstypen fast 80 % der Bauteilart-Prozesse beschrieben werden können.

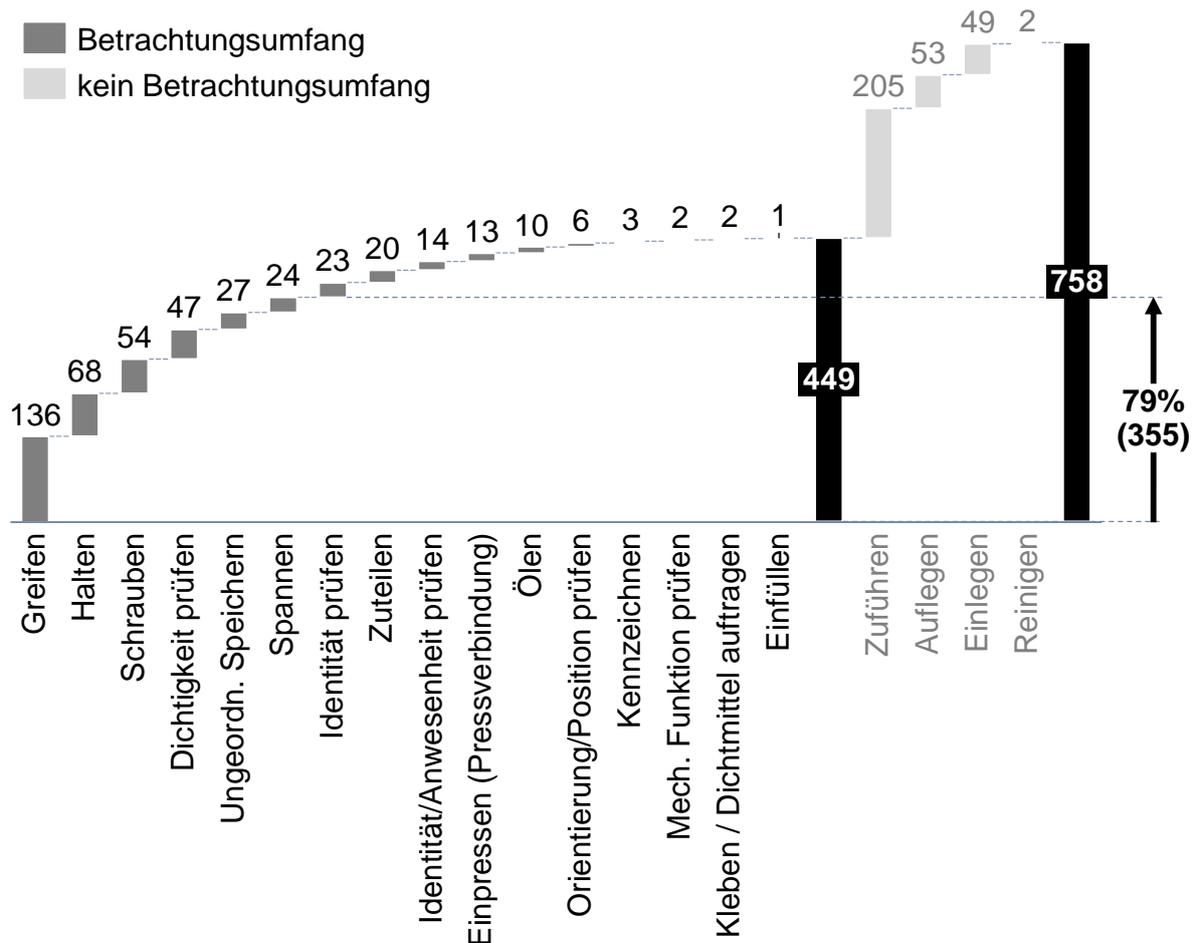
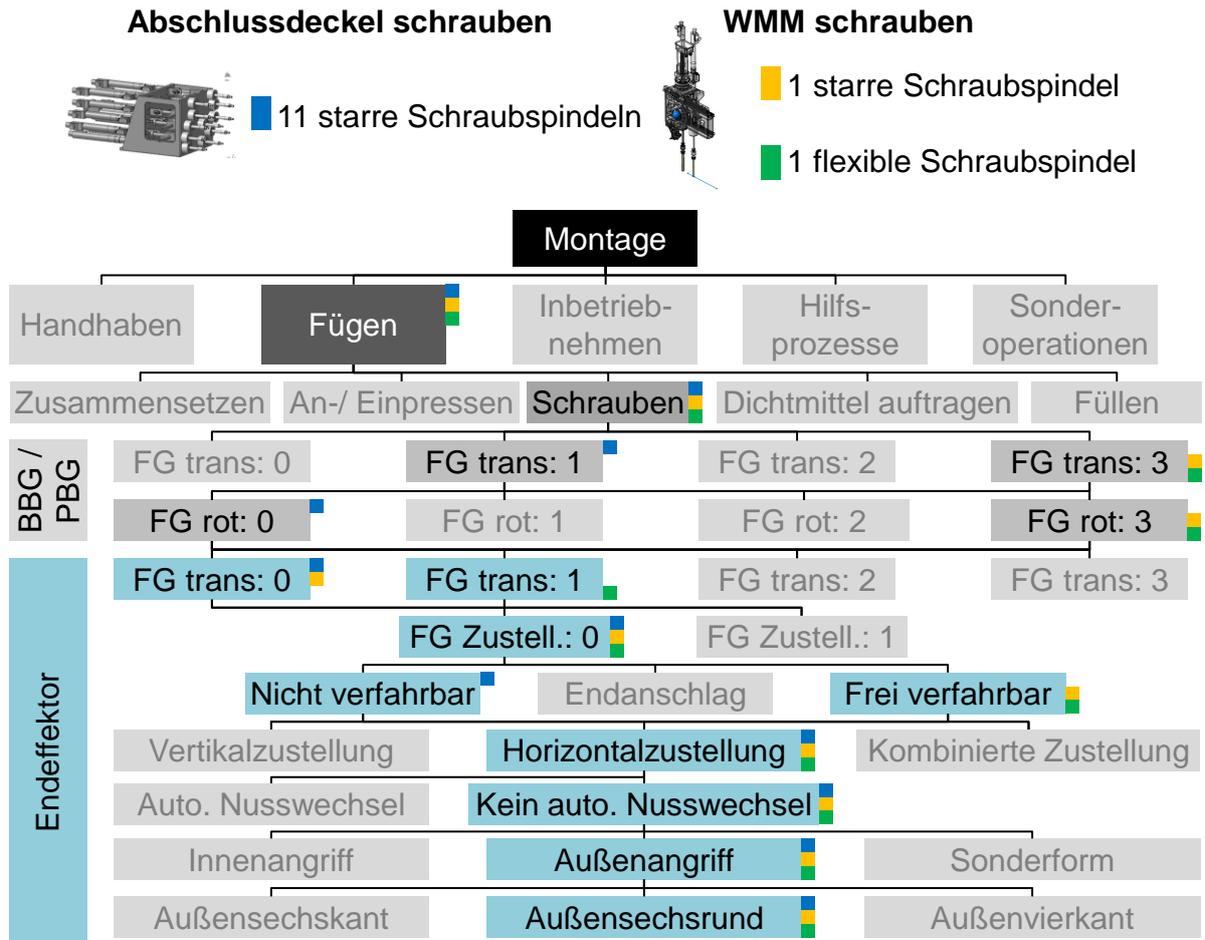


Bild 6.5: Häufigkeit der Montageprozessarten in der BMW Group Motormontage

Frequency of the Assembly Process Types in the BMW Group Engine Assembly

Bild 6.6 stellt einen Ausschnitt der Endeffektorklassifizierung dar. Darin sind die beiden Schraubprozesse zur Verschraubung des Abschlussdeckels und WMMs eingeordnet. Die Aneinanderreihung jeweils eines Elementes aus jeder Hierarchiestufe der Klassifizierung aus der Ebene Prozess ergibt einen Montageprozessarten. Werden die Bewegungs- und Prozessbaugruppe sowie die Endeffektorelemente ergänzt, ergibt sich eine Endeffektorklasse. Für die beiden Beispielprozesse ergibt sich somit der Montageprozessart „Montage – Fügen – Schrauben“. Die 11 Spindeln der Abschlussdeckelverschraubung lassen sich der Endeffektorklasse *FG trans.: 1 – FG rot.: 0 – FG trans.: 0 – FG_Zustell.: 0 – nicht verfahrbar - Horizontalzustellung – Kein auto. Nusswechsel – Außenangriff – Außensechsrund* zuordnen. Die verstellbare Schraubspindel der WMM-Verschraubung lässt sich der Endeffektorklasse *FG trans.: 3 – FG rot.: 3 – FG trans.: 1 – FG_Zustell.: 0 – frei verfahrbar - Horizontalzustellung – Kein auto. Nusswechsel – Außenangriff – Außensechsrund* zuordnen. Die nicht verstellbare Schraubspindel der WMM-Verschraubung lässt sich der Endeffektorklasse *FG trans.: 3 – FG rot.: 3 – FG trans.: 0 – FG_Zustell.: 0 – frei verfahrbar - Horizontalzustellung – Kein auto. Nusswechsel – Außenangriff – Außensechsrund* zuordnen. Dabei zeigt der unterstrichene Teil den Unterschied zwischen den beiden Endeffektorklassen bei der WMM-Verschraubung an.



Legende:

BBG = Bewegungsbaugruppe PBG = Prozessbaugruppe

Bild 6.6: Einordnung der Validierungsfälle in die Klassifizierung

Placement of the Validation Cases in the Classification

Bei Einteilung der sechs häufigsten Montageprozesstypen in Endeffektorklassen ist ersichtlich, dass je Montageprozesstyp eine unterschiedliche Zahl an Endeffektoren und Endeffektorklassen existiert. Je Endeffektorklasse sind in der Regel andere Parameter zur Beschreibung der Fähigkeiten und andere Methoden zur geometrischen Absicherung erforderlich. Das Verhältnis von Endeffektorklassen zu Endeffektoren ergibt somit einen Effektivitätsparameter. Dieser gibt an, wie hoch der Aufwand zur Entwicklung von Methoden zur geometrischen Absicherung ist. Ist das Verhältnis niedrig, werden nur wenige Absicherungsmethoden benötigt, um eine relativ hohe Zahl an Endeffektoren abzubilden. Für Montageprozesstypen mit kleinerem Effektivitätsparameter sollten eher Absicherungsmethoden entwickelt werden als für solche mit höherem Effektivitätsparameter.

Tabelle 6.1 zeigt die Anzahl der Endeffektorklassen und Endeffektoren je Montageprozesstyp vor und nach der Beschreibung der Fähigkeitsparameter. Es kommt teilweise vor, dass mehrere Endeffektorklassen mit den gleichen Fähigkeitsparametern beschrieben werden können. Diese lassen sich gemäß Kapitel 5.1.1 zusammenfassen.

Der Effektivitätsparameter wird dadurch weiter reduziert. Für die sechs häufigsten Montageprozessstypen ergibt sich somit, dass beim Schrauben die größte Effektivität erreicht wird. Wenn für 13 Endeffektorklassen Methoden der geometrischen Absicherung definiert werden, können 442 Endeffektoren und 54 Bauteilart-Prozesse abgesichert werden. Das entspricht 11% aller Endeffektoren und 12 % aller betrachteten Bauteilart-Prozesse. Deshalb wird die Validierung anhand des Montageprozessstyps Schrauben durchgeführt. Die gewählten Bauteilart-Prozesse *WMM verschrauben* und *Abschlussdeckel verschrauben* sind folglich repräsentativ für die Validierung.

Tabelle 6.1: Effektivitätsparameter zur Entwicklung von Absicherungsmethoden

Parameter of Effectivity for the Development of Validation Methods

ID	Montage-Prozesstyp	Bauteilart-Prozesse	Endeffektoren	Endeffektorklassen vor Parameterbeschreibung	Endeffektorklassen (vorher) / Endeffektoren	Endeffektorklassen nach Parameterbeschreibung	Endeffektorklassen (nachher) / Endeffektoren
1	Greifen	136	1246	207	0,17	54	0,04
2	Halten	68	767	117	0,15	37	0,05
3	Schrauben	54	442	56	0,13	13	0,03
4	Dichtigkeit prüfen	47	67	17	0,25	12	0,18
5	Ungeordnetes Speichern	27	75	11	0,15	8	0,11
6	Spannen	24	1146	192	0,17	41	0,04

Legende:

Hohe Effizienz

Mittlere Effizienz

Niedrige Effizienz

6.2.2 Datenmodell

Data Model

Die beiden Bauteilart-Prozesse und deren Absicherungsfälle werden in der Datenbank wie folgt eingetragen. Es wird zunächst die Prozess- und Betriebsmittelklassifizierung in der Datenbank hinterlegt. Damit sind der Montageprozessstyp und die Endeffektorklasse beschrieben. Zu jeder Endeffektorklasse werden die beschriebenen Fähigkeitsparameter in der Parametergruppe hinterlegt.

Es wird für die Validierung lediglich eine Montagelinie betrachtet. Die Einteilung der entsprechenden Station zur Verschraubung des Abschlussdeckels ist in Bild 6.7 dargestellt. Damit sind die Einträge der Entitäten Betriebsmittel, Bewegungsbaugruppe, Prozessbaugruppe und Endeffektor beschrieben.

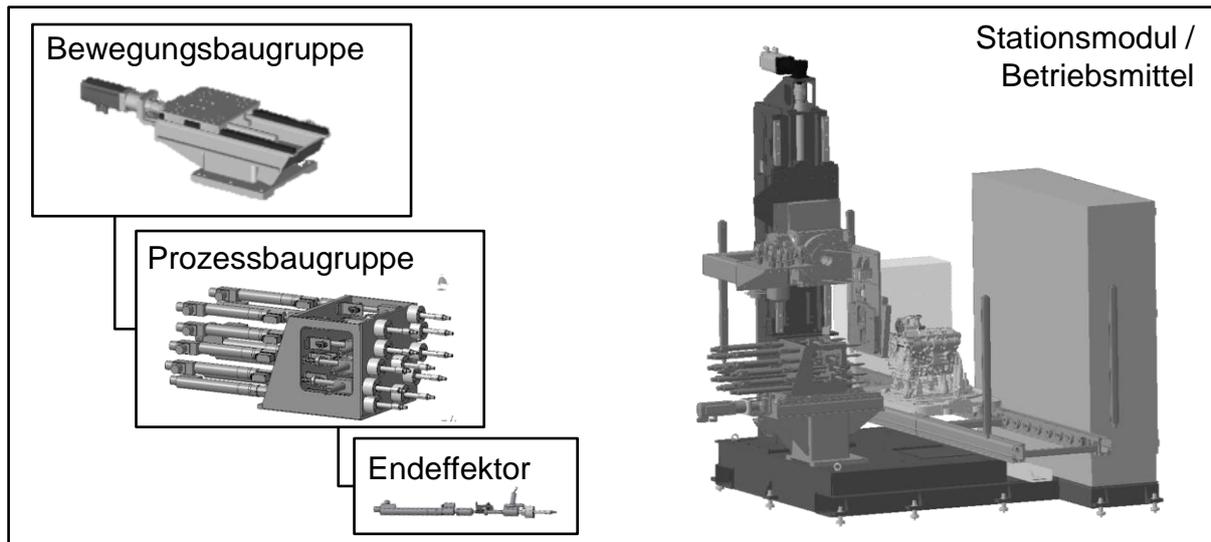


Bild 6.7: Einteilung des Betriebsmittels zur Verschraubung des Abschlussdeckels

Structuring of the Resource for Tightening the Engine Cover

Zusätzlich werden die auf der betrachteten Montagelinie montierten Produktvarianten hinterlegt. Dazu werden sämtliche Bauteilarten und Bauteilvarianten in die Datenbank eingetragen.

Nun kann der Bauteilart-Prozess festgelegt werden: *Abschlussdeckel verschrauben*. Die der Endeffektorklasse zugehörige Fähigkeitsschablone kann nun für jeden Endeffektor des Betriebsmittels befüllt werden. Für das Beispiel der Endeffektorklasse der Abschlussdeckelverschraubung sind die entsprechenden Parameter in Tabelle 6.2 dargestellt und die Ausprägungen zugeordnet. Einige baubarkeitsrelevanten Parameter bleiben an dieser Stelle unbefüllt, da sie zu einem späteren Zeitpunkt durch die Baubarkeitsprüfungssoftware ACT automatisiert ermittelt werden.

Tabelle 6.2: Fähigkeitsparameter für die Abschlussdeckelverschraubung*Parameters of the Capabilities for Tightening the Engine Cover*

Fähigkeitstyp	Fähigkeitsparameter	Parametertyp / Prüfungsart	Ausprägung	
			Min	Max
Erreichbarkeit	Zustellweg	Input Simulation	0mm	100mm
	Erreichbarkeit	Simulativ		
Zugänglichkeit	Zugänglichkeit ohne Toleranz	Simulativ		
	Zugänglichkeit mit Toleranz	Simulativ		
	Toleranz	Input Simulation	0mm	1,5mm
Eignung Endeffektor	Schraubkopftyp	Simulativ		
	Drehmoment	Parameterbasiert	6Nm	20Nm
	Sicherheitsklasse	Parameterbasiert	C	A

6.2.3 Automatisierte Bauzustandserzeugung

Automated Creation of the Assembly State

Nach der Befüllung der Datenbank kann die automatische Bauzustandserzeugung mit dem sogenannten Dressleveltool durchgeführt werden. Zur Sicherstellung der korrekten Funktion des Dressleveltools müssen insbesondere die Stationsreihenfolge in der Tabelle für die Stationsvorgänger, die Zuordnung der Bauteilartprozesse zu den Betriebsmitteln und die bekannten Bauteilvarianten angelegt werden. Je mehr Bauteilvarianten bereits angelernt wurden, desto höher ist die Ergebnisqualität. Um sicherzustellen, dass Bauzustände erzeugt werden können, wenn bestimmte Bauteilbezeichnungen noch unbekannt sind, müssen die Schlüsselwörter gepflegt werden. Das Datenbanktool erkennt automatisch unbekannte Schlüsselwörter und ordnet diesen den Bewertungsindex 999 zu. Der Administrator kann die Bewertung der Schlüsselwörter mit Experten durchführen. Dies wurde für die vorliegende Arbeit im Anwendungsfall der BMW Group Motormontage durchgeführt. Ein Ausschnitt des Ergebnisses ist in Bild 6.8 dargestellt. Die Bewertungsskala reicht dabei von 0 bis 3. 0 bedeutet, dass der Begriff keine Zuordnung der Bauteilvariante zu einer Bauteilart zulässt. Mit zunehmendem Bewertungsindex steigt die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Begriff auf eine eindeutige Bauteilart hinweist.

T_Dresslevel_Stringsearch		
ID	T_DL_String	T_DL_Wahrscheinlichkeiten
44	HSB	3
45	SECHSRUNDSCHRAUBE	3
46	BM8X12-8.8-ZNS3	3
47	M6X12-8.8-ZNNIV	3
48	WASSERRUECKLAUF	3
49	QEB	999
50	CLIP	2
51	D12	0
52	BIS	1
53	14	0
54	ZUENDKERZE	3

Legende:

Bewertung	korrekte Verbauort-Zuordnung anhand dieses Schlüsselworts
0	Nicht möglich
1	Geringe Wahrscheinlichkeit
2	Mittlere Wahrscheinlichkeit
3	Hohe Wahrscheinlichkeit
999	noch nicht bewertet

Bild 6.8: Schlüsselwortbewertung für das Dressleveltool

Assessment of the Key Words for the Dresslevel Tool

Da die initiale Datenbefüllung sehr aufwändig ist, wird angenommen, dass lediglich ein Teil der Bauteilbezeichnungen aus der TÜ0 hinterlegt sind. Die Schlüsselwortmethode wird auf ein TÜ1- und ein TÜ0-Gesamtmotormodell angewendet. Bild 6.9 zeigt, dass in beiden Fällen eine sehr hohe Zuordnungsqualität erreicht wird. Dies wird im Beispiel damit ermittelt, wie häufig die Zuordnung der Bauteilvariante zu einer Station über die Sachnummer der Zuordnung über die Bauteilbezeichnung entspricht. Jeder Punkt stellt eine Bauteilvariante dar. Auf den Achsen sind die Stationen anhand von laufenden Nummern eingetragen. Auf der horizontalen Achse wird der Punkt an der Station eingeordnet, wo die Bauteilvariante laut Sachnummernsuche dem Betriebsmittel zugeführt wird. Auf der vertikalen Achse wird der Punkt an der Station eingeordnet, wo die Bauteilvariante laut Schlüsselwortmethode zugeführt wird. Bei jedem Punkt auf der diagonalen Linie entspricht folglich die Sachnummernzuordnung der Schlüsselwortzuordnung. Bei beiden betrachteten Produktvarianten sind nur wenige Abweichungen von der diagonalen Linie erkennbar. Es gibt vereinzelte Treffer auf der horizontalen Achse, die nur über die Sachnummer, nicht aber über die Schlüsselwortmethode zugewiesen werden konnten. Andererseits gibt es einige Bauteilvarianten, deren Sachnummer unbekannt ist, die aber über die Schlüsselwortmethode einer Station zugeordnet werden können.

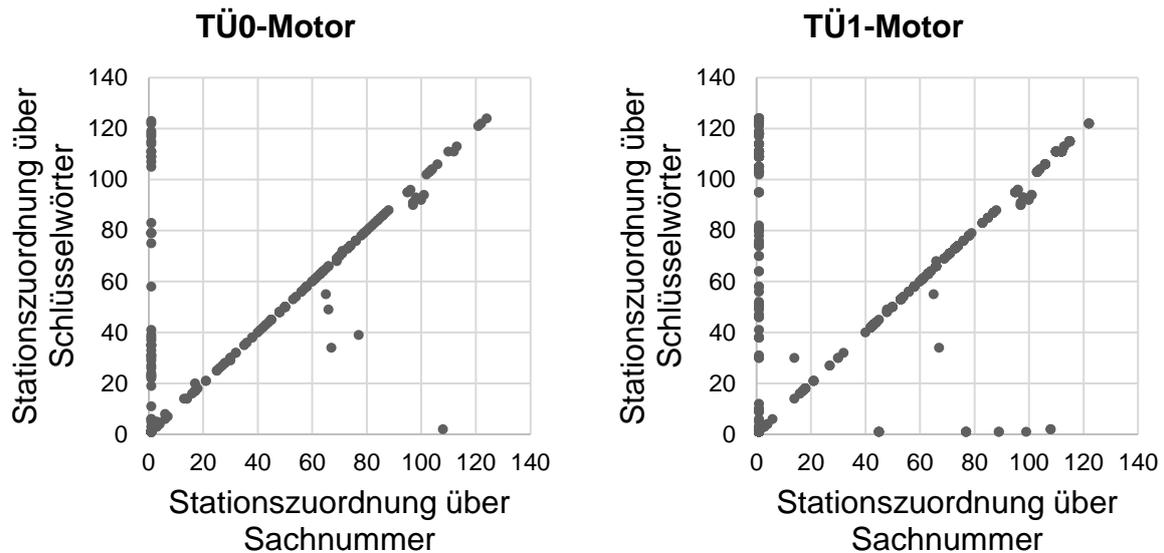


Bild 6.9: Bewertung der Zuordnungsqualität mit der Schlüsselwortmethode

Assessment of the Mapping Quality with the Key Words Method

Das Dressleveltool wird nun jeweils für die Station der Abschlussdeckelverschraubung und der WMM-Verschraubung auf einen TÜ0- und einen TÜ1-Motor angewendet. Das Ergebnis ist in Bild 6.10 dargestellt.

In den Bildern ist ersichtlich, dass bei den neueren Motormodellen der TÜ1 im Vergleich zur TÜ0 deutlich mehr Bauteile eine andere Farbgebung als grün aufweisen. Für die unsicheren Methoden der Stationszuweisung wird die Farbgebung nach Bild 5.8 angewendet. Insbesondere bei den Farben rot, lila, blau, hellblau und orange sollte die Zuordnung überprüft werden. Dies wird in der entwickelten Software ermöglicht, indem die Liste aller Bauteile nach der Farbe gefiltert werden kann, in der sie eingefärbt wurde.

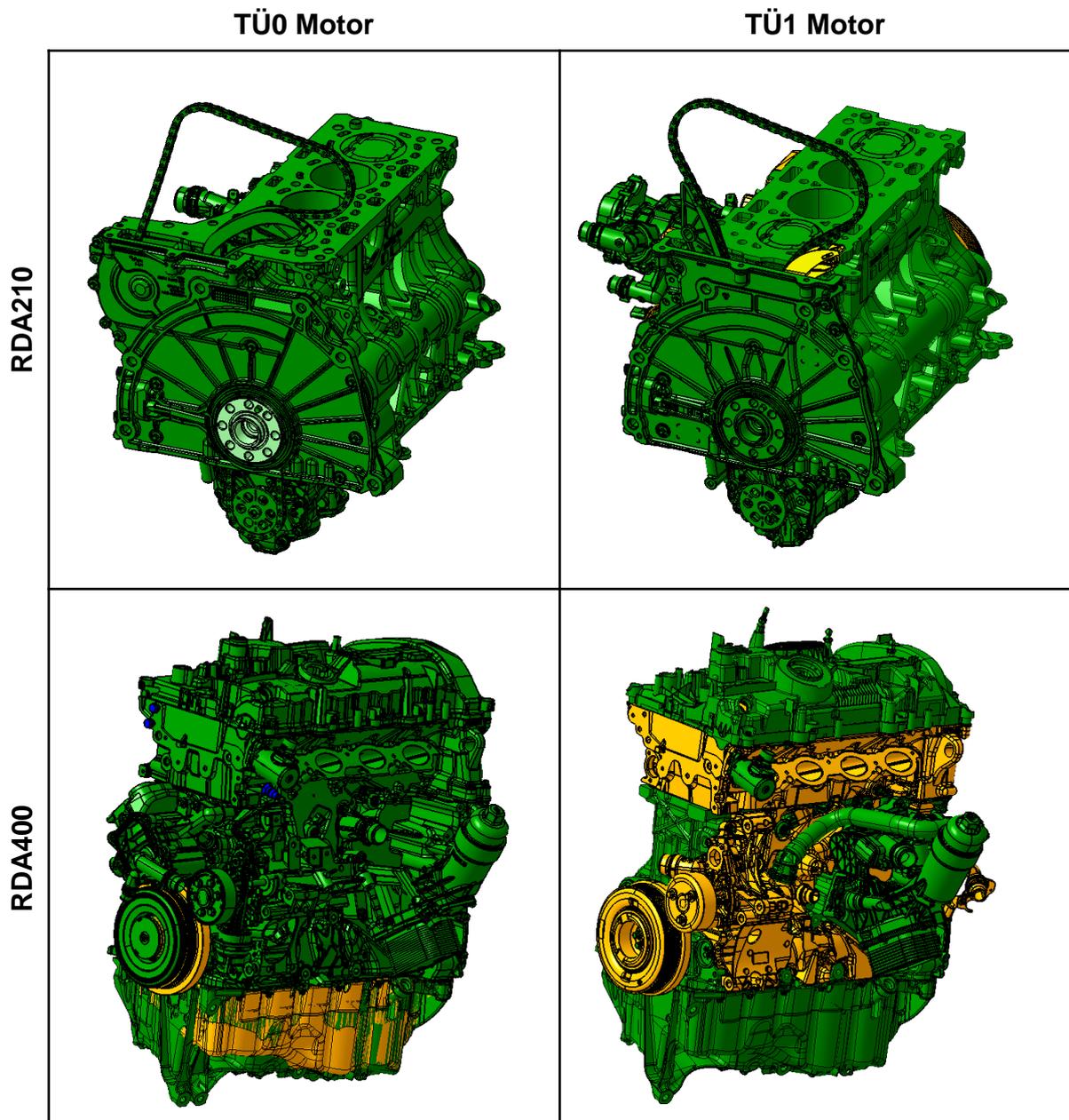


Bild 6.10: Motorbauzustände TÜ0 und TÜ1 an den Stationen RDA210 und RDA400

Engine Assembly States Revision 0 and 1 at the Stations RDA210 and RDA400

Für den 4-Zylinder Otto-Motor aus der TÜ1 ist dies in Bild 6.11 bei den über die Schlüsselwortmethode erkannten Bauteilen (Fall: orange) aus der Bauzustandserzeugung in der Station der Abschlussdeckelverschraubung dargestellt. Der Eintrag der korrekten Stationszuordnung für den gewählten Zylinderkopf wird in der Spalte `Station_zuweisen` in der Datenbank hinterlegt, sodass bei einem neuen Durchlauf des Dresselveltools die Zuordnung zur Station automatisch erfolgen kann.

Farben aus- und einblenden

Green Light Green Light Blue Yellow Lemon Chiffon Blue Orange Purple Red Color Reset

Ergebnis

Suche: orange

	Sachnummer	Benennung	Fall	Stationen	Station_zuweisen
	9452842	AW ZB ZYL.-KOPF B48A ZIK TU1 LF AB...	Orange - ausgeblendet	ZFA010(8)	ZFA010
	8625313	ZB TRAEGER EWP BOSCH PCE XL LKB...	Orange - ausgeblendet	FDM200(4)	
	2379297	CA B48 MKBB SENSORIK 1 LK RWD	Orange - ausgeblendet	FDM160(6)	
	4612431	CA B48 MKBB SENSORIK 1 LK AWD	Orange - ausgeblendet	FDM160(6)	
	2384304	CA G01 GZX B48B MKBB SENSORIK 1 R...	Orange - ausgeblendet	FDM160(6)	
	2379297	CA B48 MKBB SENSORIK 1 LK RWD	Orange - ausgeblendet	FDM160(6)	
	4612431	CA B48 MKBB SENSORIK 1 LK AWD	Orange - ausgeblendet	FDM160(6)	
	8654217	ZB HALTER DXE PDM X29 RM	Orange - ausgeblendet	TDM090(3)	
	9454102	ZB HALTER DXE PDM GZX DMC	Orange - ausgeblendet	TDM090(3)	
	9846777	HALTER SVM G60 G70	Orange - ausgeblendet	TDM090(3)	
	8632555	ZB HALTER DXE PDM BC X RM	Orange - ausgeblendet	TDM090(3)	
	8654215	ZB HALTER DXE PDM HC X RM	Orange - ausgeblendet	TDM090(3)	
	8693006	ZB BLOWBYLEITUNG B58 TUE1	Orange - ausgeblendet	TDX999(3)	
	9904371	SECHSKANTSCHRAUBE M6X16-8.8-ZN...	Orange - ausgeblendet	TDX999(3)	
	9227473	FLANSCHMUTTER M6 FREMDBESTRO...	Orange - ausgeblendet	TDX999(9)	
	9907467	SECHSKANTMUTTER M6-10-ZNNIV SI	Orange - ausgeblendet	TDX999(3)	
	9909376	SCHRAUBE KS-M8GFX25-10.9-C-ZNS3	Orange - ausgeblendet	FDM170(2)	
	9909376	SCHRAUBE KS-M8GFX25-10.9-C-ZNS3	Orange - ausgeblendet	FDM170(2)	

Änderungen speichern

Bild 6.11: Manuelles Korrigieren des Verbauortes

Manual Correction of the Assembly Step

Das Ergebnis wird abschließend genutzt, um den Strukturbaum des CAD-Modells in Montager Reihenfolge umzusortieren. Das Ergebnis ist für die 4-Zylinder Otto-Motorvariante aus der Tü1 in Bild 6.12 dargestellt.

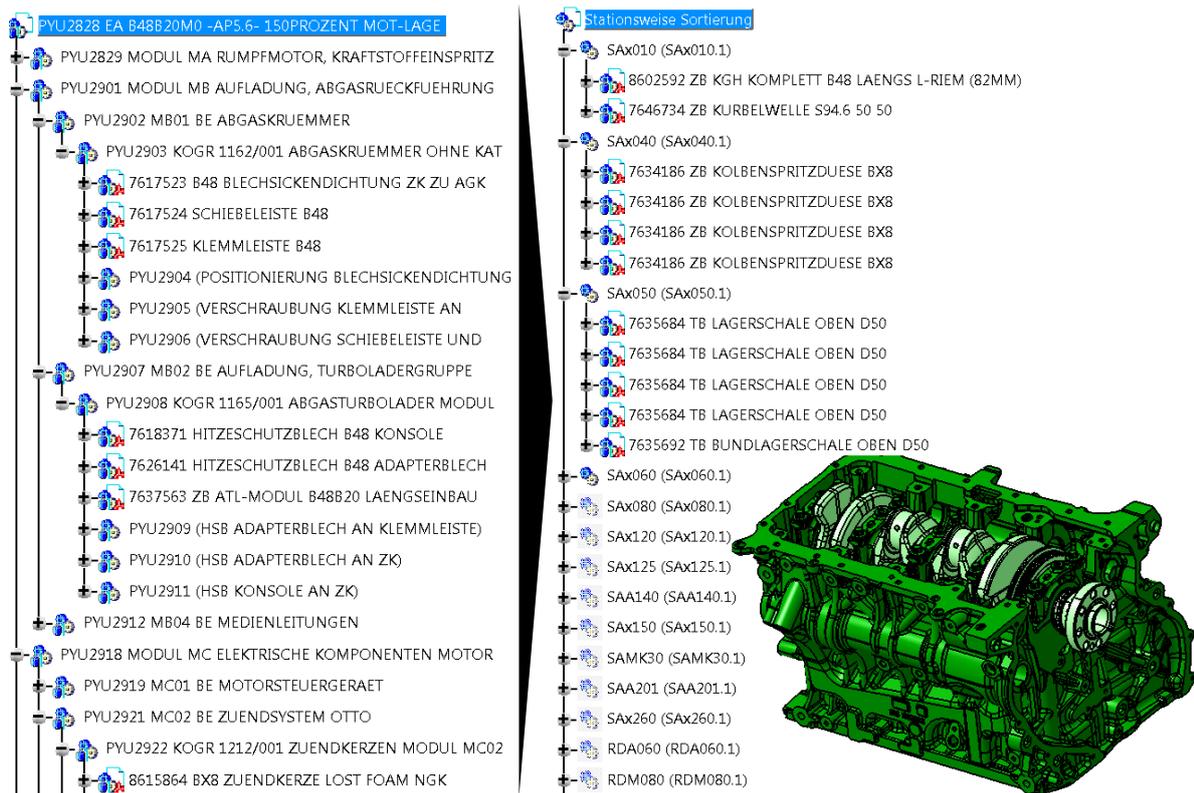


Bild 6.12: Mit dem Dressleveltool umsortierter Strukturbaum in CATIA

Resorted Structure Tree by the Dresslevel Tool in CATIA

6.3 B) Validierung der Rekonfigurationsräume

Validation of the Reconfiguration Areas

Für die Validierung des Konzepts zur Definition von Rekonfigurationsräumen müssen, wie in Schritt A in Bild 5.10 dargestellt, zunächst die Top-Themen der Vorentwicklung in einer Liste gesammelt werden. Im Beispiel wird daraus das Thema *einteiliger Kettentrieb* am höchsten priorisiert. Dieses Thema bestand bei der BMW Group vor Einführung der ersten technischen Überarbeitung als Vorentwicklungsthema. Bild 6.13 zeigt einen ausgefüllten Steckbrief, in dem das Thema kurz durch die Vorentwicklungsingenieure beschrieben wurde.

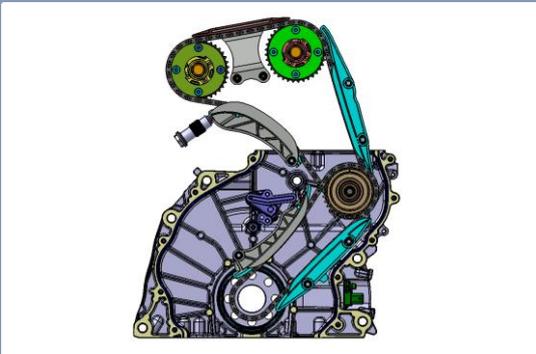
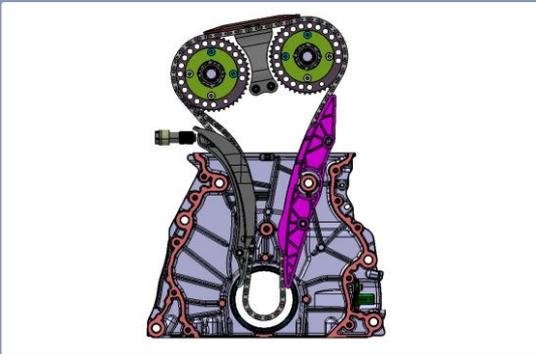
Veränderungsbeschreibung		Einteiliger Kettentrieb	
Allgemeine Beschreibung der Produktänderung:	Umstellung von einem zweiteiligen auf einen einteiligen Kettentrieb. Es wird nur eine Steuerkette verwendet.		
Geometrische Änderung:	Entfall des Zwischenrads und einer Kette. Veränderter Abschlussdeckel → Varianten und neue Schraubpunkte.		
Absehbare Auswirkung auf den Montageprozess:	Kettentrieb: weniger Spannschienen, nur 1 Kette Abschlussdeckel: Veränderung Schraubpunkte, zus. Variante, keine Änderung Steuerzeiten		
Grund der Änderung / Vorteile:	Weniger mech. Komplexität → Qualitätsverbesserung Kostensparnis durch Entfall Bauteile, schmalerer Aufbau		
Betroffene Bauteile:	Steuerketten, Spannschienen, Ölpumpe, Abschlussdeckel		
Verwendung / Verbau		Ersteinsatz: Tü1 Ottomotor (4-Zylinder Quereinbau) Rollout auf alle Otto-Motoren geplant	
Weitere Informationen			
Prinzipdarstellung für Prototyp in CAD		Link1	
Unterlagen einteiliger Kettentrieb		Link2	
Bild vorher: zweiteilig		Bild nachher: einteilig	
			
Ansprechpartner			
Name: Max Mustermann		Abteilung: Vorentwicklung Otto	

Bild 6.13: Steckbrief Produktänderung für den ‚einteiligen Kettentrieb‘

Fact Sheet of the Product Change for the ‘one-piece chain-drive’

Zudem muss die grundlegende strategische Ausrichtung des Produktionssystems bewertet werden (Schritt B in Bild 5.10). In diesem Fall werden zwei unterschiedliche Szenarien betrachtet (Bild 6.14). Das Szenario 1 geht von einer fallenden Stückzahl bei zeitgleich starken Stückzahlschwankungen aufgrund hoher Unsicherheiten aus. Die Variantenflexibilität hingegen wird als hoch angenommen. Hierfür wird ein niedriger Automatisierungsgrad mit vielen manuellen Tätigkeiten angenommen. Umbauten sollen innerhalb einer Produktionsunterbrechung realisiert werden können, wobei eine Produktionsunterbrechung die Dauer von 2 Wochen hat. Bei dem Szenario 2 sollen

Umbauten ebenfalls innerhalb einer Produktionsunterbrechung realisierbar sein. Die Stückzahlentwicklung wird hingegen als steigend bei mittleren Schwankungen angenommen. Die Montageanlagen sollen auf mittlere Variantenflexibilität, aber einen hohen Automatisierungsgrad ausgelegt sein. Das Szenario 2 wird derzeit als realistisch angesehen. Im Folgenden wird für dieses Szenario ein Konzept entwickelt.

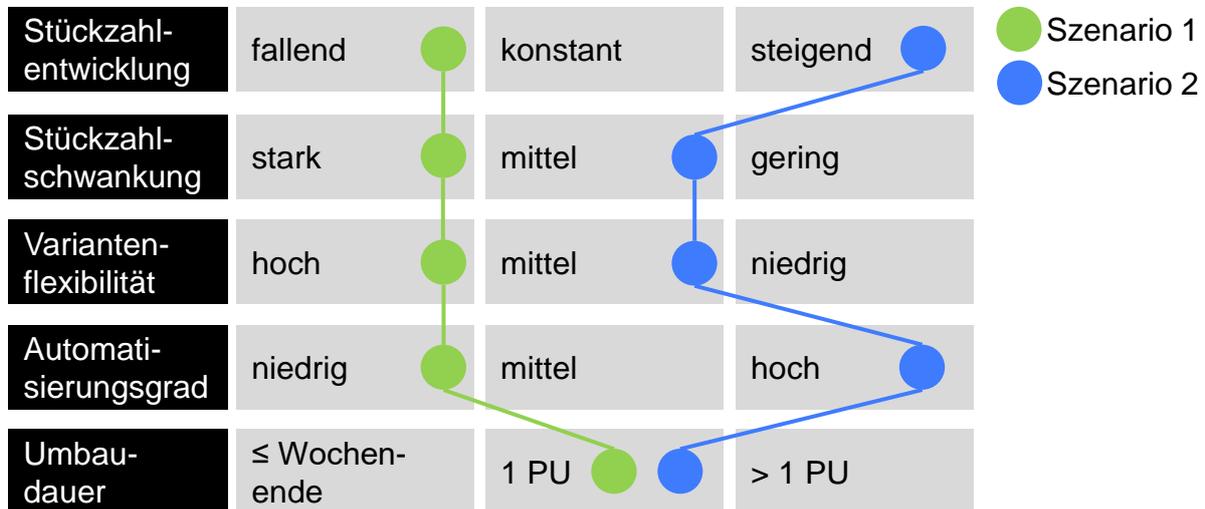


Bild 6.14: Unternehmensstrategische Bewertungsszenarien

Enterprise-Strategic Assessment Scenarios

Zur Vorauswahl der kritischen Stationen, für die ein Rekonfigurationsraum definiert werden muss, muss gemäß Schritt 1 in Bild 5.10 die Stationsflexibilität bewertet werden. Dafür werden zunächst die von der potenziellen Produktänderung betroffenen Montagestationen ausgewählt. Anschließend werden diese hinsichtlich der Flexibilitätsparameter aus Tabelle 5.1 bewertet.

Eine betroffene Station ist die Abschlussdeckelverschraubung RDA210 in der Montagelinie in München. Diese ist eine Multispindel-Verschraubeinheit mit einer Bewegungsbaugruppe mit einem translatorischen Freiheitsgrad (Verstellung in Y-Richtung). Die Prozessbaugruppe und die elf Endeffektoren besitzen keine Verstellmöglichkeiten. Es können folglich lediglich elf festgelegte Schraubpunkte erreicht werden. Die Flexibilitätsbewertung fällt demnach wie in Bild 6.15 dargestellt aus. Ist das Kreuz links gesetzt, wird ein Flexibilitätspunkt vergeben, ist das Kreuz mittig platziert, 2 Punkte und ist das Kreuz rechts platziert, werden 3 Punkte vergeben.

Station:	RDA210	Fall-Nr.:	001	Ergebnis:	11
Bewertung der Stationsflexibilität (IST-Zustand)					
Automatisierungsgrad					
vollautomatisiert	teilautomatisiert	manuell			
x					
Anlagenkomplexität (Einschwingzeit, Sonderabläufe, etc.)					
komplexer Aufbau	Standard-Aufbau	einfacher Aufbau			
		x			
Fehlerentdeckungswahrscheinlichkeit (Qualitätsabsicherung)					
Motorenwerk (hoch)	Fahrzeugwerk (mittel)	Endkunde (niedrig)			
x					
Taktzeitauslastung (Engpassstation bei Stückzahlerhöhung)					
kritisch (hoch)	mittel	unkritisch (niedrig)			
x					
Bewegungsfreiheitsgrade (Bewegungs- und Prozessbaugruppe)					
keine Flexibilität	geringe Flexibilität	große Flexibilität			
	x				
Geometrische Flexibilität der Endeffektoren (z.B. flexible Greifbacken)					
keine Flexibilität	geringe Flexibilität	große Flexibilität			
x					
Flächenauslastung					
Schaffung neuer Flächen (z.B. Bühne) → hoch	Umfunktionieren vorhandener Flächen möglich (z.B. Logistik) → mittel	Montagefläche vorhanden → niedrig			
	x				

Bild 6.15: Bewertung der Stationsflexibilität für die Montagestation RDA210

Assessment of the Station Flexibility for the Assembly Station RDA210

Daraus ergibt sich eine Flexibilitätskennzahl von 11 Punkten. Dies entspricht einer geringen Flexibilität, sodass hier eine Entwicklung eines Rekonfigurationsraumes erforderlich wird. Die Darstellung der durch die Änderung des Kettentriebs betroffenen Stationen und deren Flexibilitätseinordnung findet sich in der Layoutsicht in Bild 6.16. An den beiden grün markierten Stationen werden an Handarbeitsplätzen die Steuerketten montiert sowie die Ölpumpe geheftet. Die Ölpumpe wird an der Station RDA180 mit einem flexiblen Schraubroboter verschraubt.

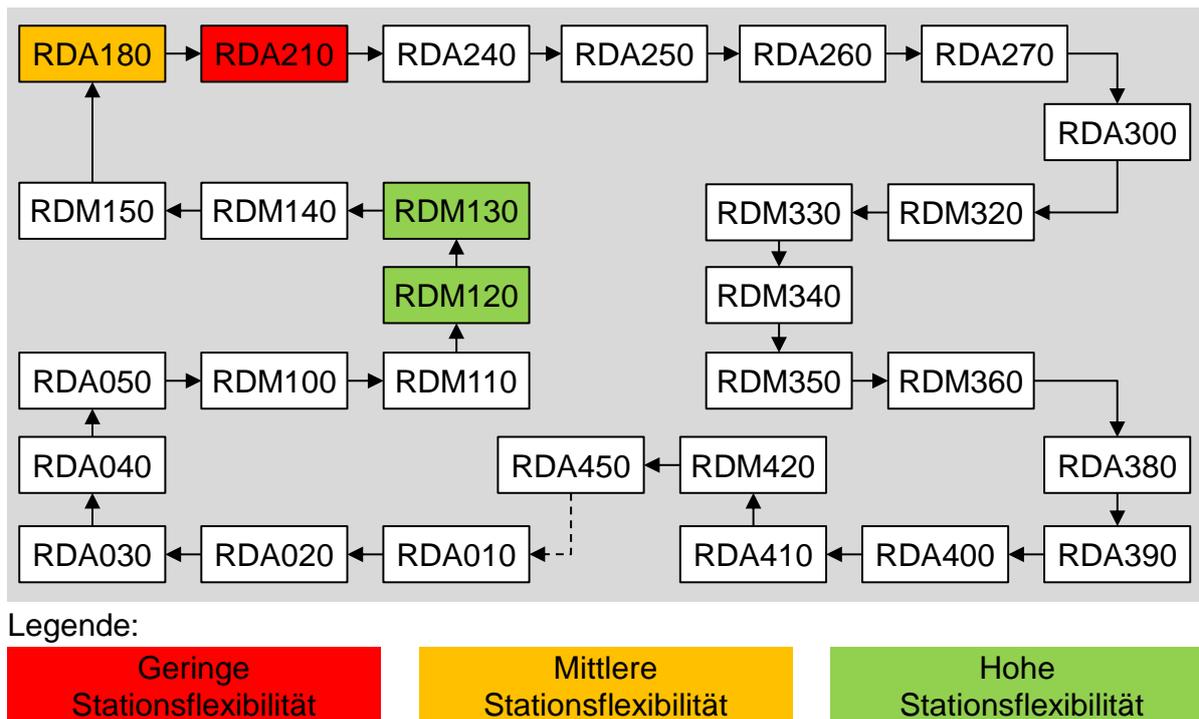


Bild 6.16: Ergebnis der Stationsflexibilitätsbewertung anhand der BMW Group Motormontage

Result of the Station Flexibility Assessment at BMW Group Engine Assembly

Für die Station RDA210 muss folglich ein Rekonfigurationsraum entwickelt werden, um die Integration des einteiligen Steuertriebs zu ermöglichen. Die geforderte Flexibilität wird gemäß der Produktbeschreibung hinsichtlich der Schraubstellen benötigt. Es werden neue Abschlussdeckelvarianten erwartet. Deshalb wird im ersten Schritt von dem Fall mit der größten Auswirkung ausgegangen. Es wird angenommen, dass alle Schraubpositionen in der Position und der Richtung variieren können und, dass die Anzahl der Schraubpunkte erhöht werden kann. Die Schraubkopftypen werden auch als veränderbar angenommen. Es kann also aufgrund zusätzlicher Schraubpositionen vorkommen, dass Stichmaßverstellungen nicht ausreichend sind. Dies kann zu einer Erhöhung der Bearbeitungszeit über die Taktzeit führen. Die strategische Ausrichtung des Produktionssystems im als am wahrscheinlichsten bewerteten Szenario 2 zielt jedoch auf eine Erhöhung der Stückzahl und damit eine Taktzeitverkürzung ab. Somit wird im schlimmsten Fall eine neue Schraubstation für die neue Variante erforderlich. Dafür wird zunächst Fläche benötigt. Es wurde bewertet, dass das Umfunktionieren bestehender Flächen möglich ist (Bild 6.15). In unmittelbarer Nähe zur vorhandenen Station RDA210 ist diese jedoch nicht ausreichend. Deshalb müsste im Falle einer neuen Station eine Fläche im weiteren Bandverlauf umfunktioniert werden. Um den strategischen Zielen einer hohen Variantenflexibilität bei zugleich mittlerer Automatisierung und Umbaudauer im Szenario 2 gerecht zu werden, wird von der Integration zweier Sechssachsroboter mit Doppelspindler ausgegangen, mit denen zeitgleich der Abschlussdeckel verschraubt wird, sodass zur gleichen Zeit vier Schraubstellen er-

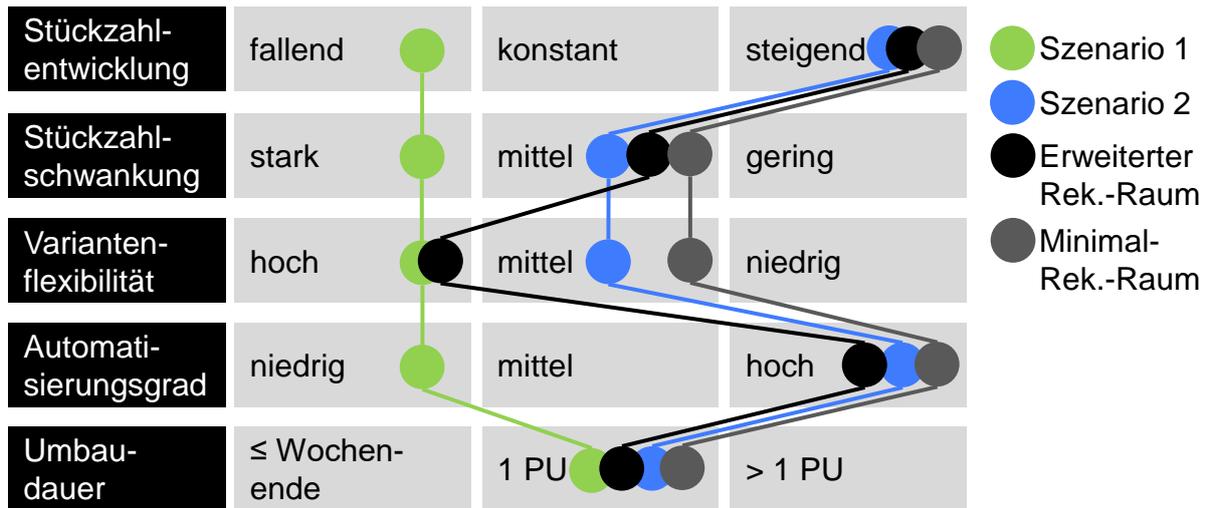
reicht werden können. Bei zukünftigen Integrationen könnten diese flexibel umprogrammiert werden. Aufgrund der erforderlichen Flexibilität hinsichtlich der Schraubkopftypen wird zudem mit einem Nusswechsler gerechnet. Für die Integration einer solchen Schraubstation müsste mit Integrationskosten größer eine Million Euro gerechnet werden. Sie entspräche dem erweiterten Rekonfigurationsraum.

Im nächsten Schritt werden Anforderungen an das Produkt generiert, mit denen sich ein Minimal-Rekonfigurationsraum realisieren ließe. Die größte Kostenauswirkung wird durch die Erforderlichkeit einer komplett neuen Station bewirkt. Um dies zu vermeiden, müssten die Produktänderungen mit Anpassungen der vorhandenen Betriebsmittel integriert werden können. Dies ließe sich zum Beispiel über die Verstellung einzelner Schraubspindeln realisieren. Zudem ließe sich durch einheitliche Schraubkopftypen ein Nusswechsler vermeiden, sodass auch die Bearbeitungszeit nicht wesentlich erhöht werden würde. Nach Priorität sortiert ergibt sich daraus folgende Anforderungsliste an den Abschlussdeckel:

- Mindestens 5 der 11 Schraubpunkte müssen einheitlich zwischen Tü0 und Tü1 bleiben.
- Der Abstand zwischen zwei Schraubpunkten bei einem Produkt darf nicht weniger als 50 mm betragen.
- Die Schraubpunkte müssen alle gleich ausgerichtet sein und in derselben Ebene liegen.
- Von der Tü0 zu der Tü1 verschobene Schraubpunkte dürfen nicht so weit verschoben werden, dass eine Verstellung von mehr als 150 mm erforderlich wird.
- Die Anzahl der Schraubpunkte darf nicht um mehr als 2 Schraubpunkte zunehmen.
- Es müssen die gleichen Schraubkopftypen wie bei der Tü0 verwendet werden.
- Es müssen die gleichen Schraubenlängen wie bei der Tü0 verwendet werden.
- Das Drehmoment darf im Vergleich zur Tü0 nicht um mehr als 10 Nm variieren.

Mit der Einhaltung dieser Anforderungen bei der Überführung der Vorentwicklungslösung in eine Serienlösung des einteiligen Kettentriebs kann sichergestellt werden, dass sich eine Integration des Produktkonzeptes nur mittels Stichmaßverstellungen realisieren lässt. Dies würde zu einer Kostenauswirkung von kleiner als 250-Tausend Euro führen. Somit ließe sich die Industrialisierung wirtschaftlicher gestalten als der erweiterte Rekonfigurationsraum (Bild 6.17).

Abschließend müssen die beiden generierten Rekonfigurationsräume in den Steckbriefvorlagen beschrieben werden. Zudem müssen sie hinsichtlich der Einhaltung der strategischen Szenarien für das Produktionssystem bewertet werden. Das Bewertungsergebnis für die beiden Szenarien ist in Bild 6.17 dargestellt. Eine hohe Punktzahl bedeutet eine gute Übereinstimmung mit den Strategiezielen und damit eine gute Eignung bei Eintreten dieses Szenarios.



	Szenario 1 ●	Szenario 2 ●	Investition
Erweiterter Rekonfigurationsraum ●	+ 2/5	4/5	≥ 1 Mio. €
Minimal-Rekonfigurationsraum ●	1/5	+ 5/5	+ <250.000 €

+ Besser geeigneter Rekonfigurationsraum

Bild 6.17: Bewertung der Rekonfigurationsräume hinsichtlich der Szenarien

Assessment of the Reconfiguration Areas Regarding the Scenarios

Der erweiterte Rekonfigurationsraum ist beispielsweise sehr gut geeignet, wenn von einer hohen Variantenflexibilität ausgegangen wird (Szenario 1). Bei geringerer geforderter Variantenflexibilität (Szenario 2) ist der Minimalrekonfigurationsraum besser geeignet. Hinsichtlich des Szenarios 1 wird mit beiden Rekonfigurationsräumen ein sehr niedriger Übereinstimmungsgrad mit den Anforderungen erreicht, wobei mit dem erweiterten Rekonfigurationsraum ein leicht besseres Ergebnis erzielt wird. Der Übereinstimmungsgrad mit Szenario 2 ist bei dem Minimalrekonfigurationsraum minimal besser. Auch mit dem erweiterten Rekonfigurationsraum wird jedoch ein gutes Ergebnis erzielt.

6.4 C) Validierung der Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten

Validation of the Visualization of Resource Capabilities

Zur Validierung der Betriebsmittelvisualisierung wird zunächst das Visualisierungsmodell für die Montage des Abschlussdeckels aufgebaut. Anschließend wird dieses Modell verwendet, um die Integration der neuen Abschlussdeckelvariante abzusichern. Ergänzt wird dies um eine Baubarkeitsuntersuchung des Wärmemanagementmoduls. Zur Analyse der Anwendbarkeit des Aufbaus der Visualisierungsmodelle wird dem in

Bild 5.13 (S. 104) dargestellten Vorgehen gefolgt. Dafür müssen zunächst die Baugruppen des Betriebsmittelmodells isoliert und die Abhängigkeiten identifiziert werden.

Die isolierten Baugruppen der Abschlussdeckelverschraubung sind bereits in Bild 6.7 (S. 142) dargestellt. Es handelt sich in diesem Fall um eine Bewegungsbaugruppe, eine Prozessbaugruppe und elf Endeffektoren. Die Endeffektoren sind Schraubspindeln und ordnen sich wie in Kapitel 6.2.1 erläutert in die Klassifizierung der Betriebsmittel ein. Die Abhängigkeiten der einzelnen Baugruppen wird gemäß Kapitel 5.3.1 in einer Bewegungsrelationsmatrix dokumentiert (Tabelle 6.3).

Tabelle 6.3: Bewegungsrelationsmatrix der Abschlussdeckelverschraubung der BMW Group

Matrix of Movement Relations of Tightening the Engine Cover at BMW Group

RDA210 - Schraubautomat	Bewegungsbaugruppe 1	Flexibel (1 translatorischer Freiheitsgrad)
		Prozessbaugruppe 1.1
	Endeffektor 1.1.1	starr
	Endeffektor 1.1.2	starr
	Endeffektor 1.1.3	starr
	Endeffektor 1.1.4	starr
	Endeffektor 1.1.5	starr
	Endeffektor 1.1.6	starr
	Endeffektor 1.1.7	starr
	Endeffektor 1.1.8	starr
	Endeffektor 1.1.9	starr
	Endeffektor 1.1.10	starr
Endeffektor 1.1.11	starr	

Diese Informationen werden verwendet, um die prozessübergreifenden Visualisierungsregeln umzusetzen. In Bild 6.18 sind die prozessübergreifenden Visualisierungsregeln angewendet. Bewegliche Elemente sind weiß eingefärbt, starre Elemente sind grau eingefärbt. Alle nicht bauteilberührenden Elemente werden transparent dargestellt. Zudem werden die kumulierten Bewegungsfreiheitsgrade der Endeffektoren, die relevant für die Erreichbarkeitsprüfung sind, mittels der blauen Linien dargestellt. In diesem Fall ergeben sich diese Freiheitsgrade durch die translatorische Achse zwischen Bewegungsbaugruppe und Prozessbaugruppe. Auf dieser können nur 2 Endanschlüsse angefahren werden, sodass die Flexibilität entsprechend mittels gestrichelter blauer Linien dargestellt wird.

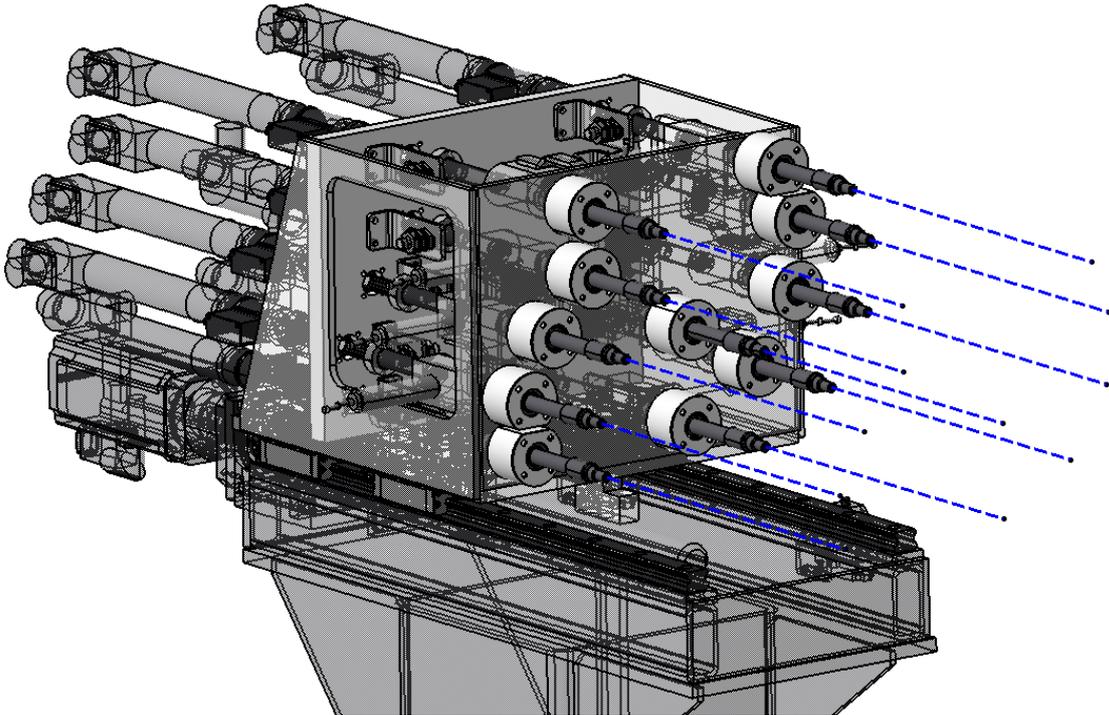


Bild 6.18: Struktur des Visualisierungsmodells zur Montage des Abschlussdeckels

Structure of the Visualization Models for the Assembly of the Engine Cover

Im nächsten Schritt müssen die Visualisierungselemente erstellt werden, die abhängig von der Montageprozessklasse sind. An dieser Stelle kommt das Regelwerk zum Einsatz. Die Auswahl der relevanten Parameter für die montagegerechte Produktgestaltung erfolgte mit Vertretern der Montageplanung, der Betriebsmittelkonstruktion und der Serienentwicklung wie in Kapitel 5.3 gefordert in einem Gremium. Das Regelwerk wird wie folgt bezeichnet: Regelwerk zur Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten (RVBF). Ein Überblick über die aufgestellten Regeln findet sich in Tabelle 6.4.

Tabelle 6.4: Regelwerk zur Visualisierung der Betriebsmittelfähigkeiten (RVBF)

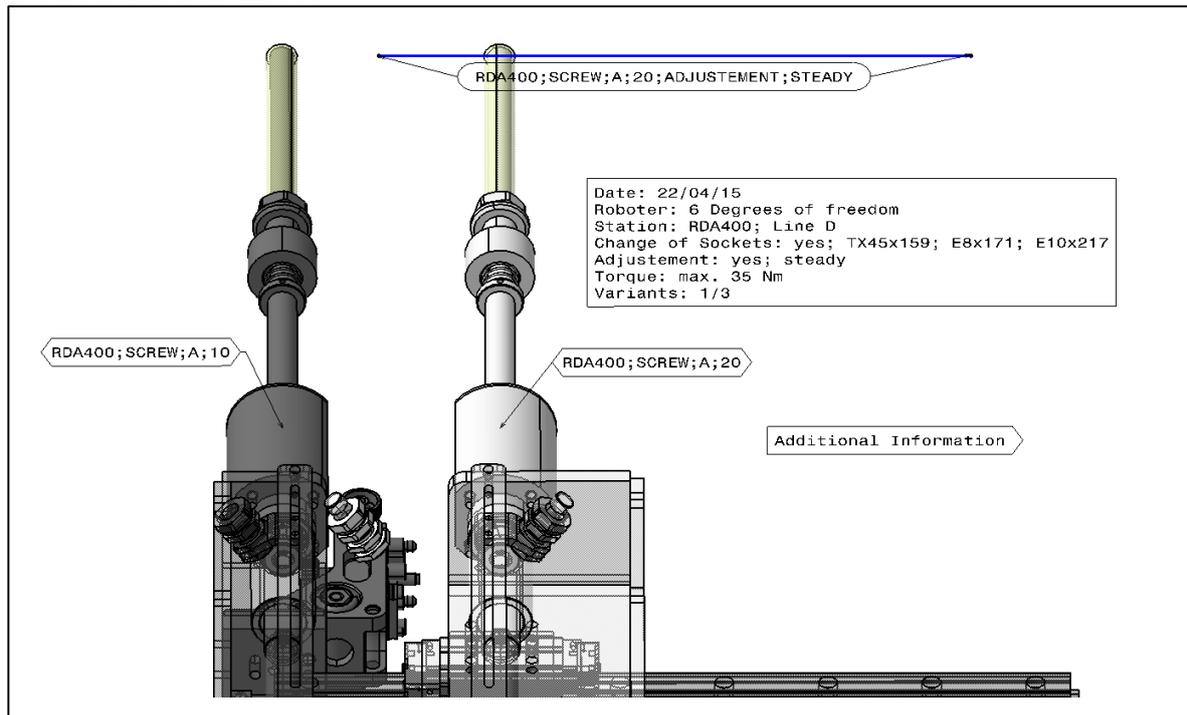
Framework for the Visualization of the Resource Capabilities (RVBF)

			Betriebsmittelfähigkeiten										
			Anzugsverfahren	Freiheitsgrade & Arbeitsbereich	Pfad	Antriebsmedium	Werkzeug-, Achsenanzahl	Ort des Arbeitspunktes	Geometrische Abmessungen	Genauigkeit	Kräfte- und Momentenbereich	Traglast	Umgebungsbedingungen & Produktionstechnologie
Prozesstypen	Handhaben	Sichern	Greifen	RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-201	RVBF 6-202	RVBF 6-104	RVBF 6-203	RVBF 6-204	RVBF 6-205	RVBF 6-206
			Halten	RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-207	RVBF 6-208	RVBF 6-104	RVBF 6-209		RVBF 6-210	RVBF 6-211
			Spannen	RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-212	RVBF 6-213	RVBF 6-104	RVBF 6-214	RVBF 6-215		RVBF 6-216
	Fügen	An- / Einpressen	Press- verbindung	RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-302	RVBF 6-202	RVBF 6-104	RVBF 6-203	RVBF 6-204	RVBF 6-205	RVBF 6-206
			Schrauben	RVBF 6-303	RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-304	RVBF 6-305	RVBF 6-104	RVBF 6-306	RVBF 6-307	
		Dichtmittel auftragen		RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-304	RVBF 6-309	RVBF 6-104	RVBF 6-310			RVBF 6-311
		Füllen	Einfüllen	RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-304	RVBF 6-312	RVBF 6-104	RVBF 6-313			RVBF 6-314
	Inbetrieb- nehmen	Funktions- prüfung	Dichtheit prüfen	RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-401	RVBF 6-402	RVBF 6-104	RVBF 6-403	RVBF 6-404		RVBF 6-405
			Mech. Funktion prüfen	RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-406	RVBF 6-213	RVBF 6-104	RVBF 6-214	RVBF 6-215		RVBF 6-407
	Hilfsprozesse	Kontrollieren	Position	RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-501	RVBF 6-502	RVBF 6-104	RVBF 6-503			RVBF 6-504
			Orientierung	RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-505	RVBF 6-208	RVBF 6-104	RVBF 6-209			RVBF 6-506
			Anwesenheit	RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-501	RVBF 6-502	RVBF 6-104	RVBF 6-503			RVBF 6-504
			Identität prüfen	RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-501	RVBF 6-502	RVBF 6-104	RVBF 6-503			RVBF 6-504
	Son- der- op.	Beölen		RVBF 6-101	RVBF 6-102	RVBF 6-103	RVBF 6-601	RVBF 6-602	RVBF 6-604	RVBF 6-603			RVBF 6-604

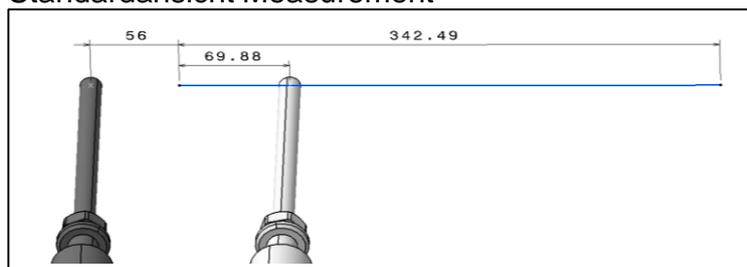
Die Verschraubung des Abschlussdeckels und des Wärmemanagementmoduls soll hier visualisiert werden. Die Visualisierungsregeln, die im Rahmen dieser Arbeit spezifisch zum Prozesstyp Schrauben entwickelt wurden, sind die Regeln RVBF 6-303 und RVBF 6-305 bis RVBF 6-308. Die restlichen Regeln in der Zeile Schrauben werden auch bei anderen Montageprozesstypen verwendet.

Da bei der Abschlussdeckelverschraubung wenig Flexibilität vorgesehen ist, werden die drei Standardansichten aus Bild 5.17 in Bild 6.19 anhand der WMM-Verschraubung dargestellt. Über die Anmerkung „Additional Information“ in der Ansicht Label sind unter anderem Prozessablaufbeschreibungen, Videos des Betriebsmittels, die zugehörigen Rekonfigurationsräume, die Prozessbaukastenforderungen zu dem WMM sowie ein Link zu einer Ausleitung aus der Datenbank verlinkt, in der die Bauteilsachnummern der bereits integrierten Bauteilvarianten hinterlegt sind.

Standardansicht Label



Standardansicht Measurement



Standardansicht Tolerance



Bild 6.19: Ansicht Label, Measurement und Tolerance im assoziativen Bauteil

Capture Label, Measurement and Tolerance in the Associative Part

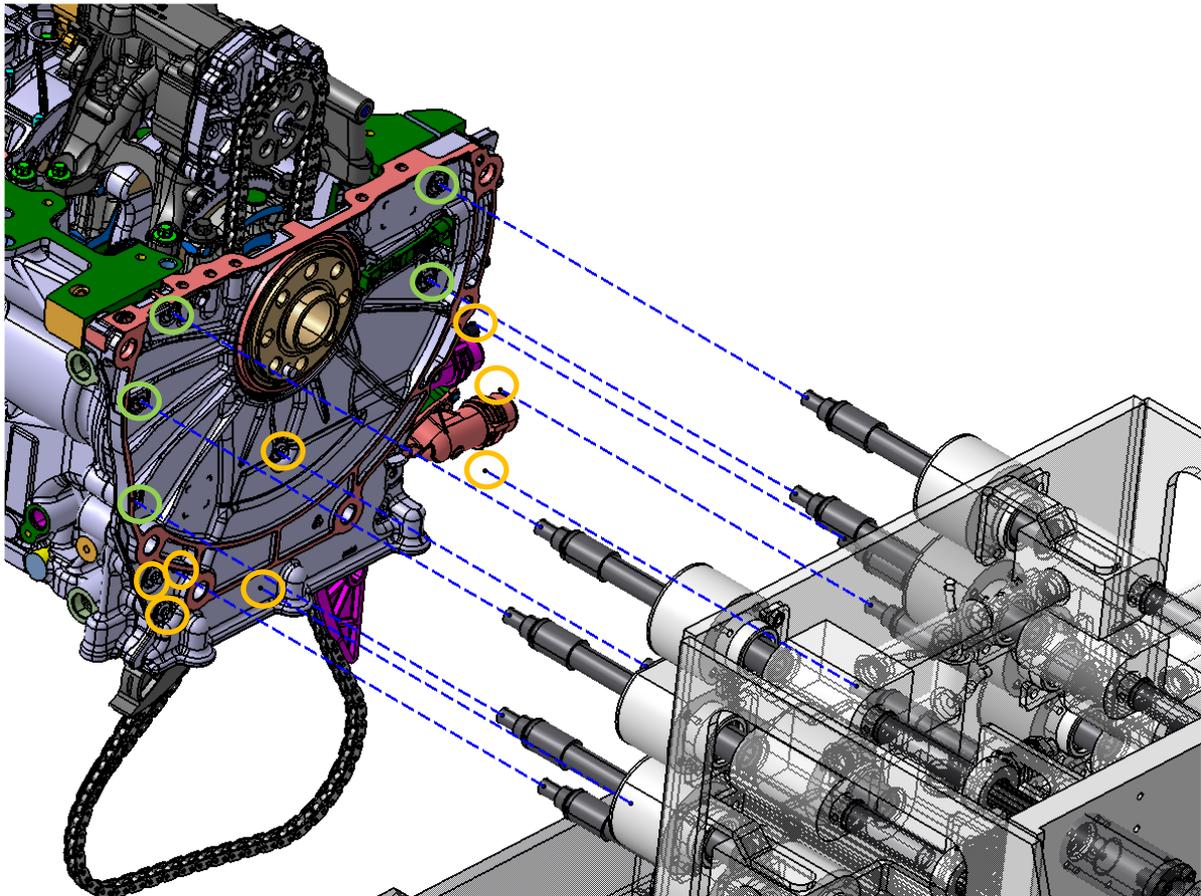
Die Visualisierungsmodelle werden im proprietären Format von CATIA V5 (*.CATProduct) erstellt und zusätzlich im Format *.JT (Jupiter Tessellation) veröffentlicht. Somit können sie auch in einem CAD-Viewer wie Teamcenter Visualization oder dem JT2Go Viewer der Firma Siemens angezeigt werden.

Die Fähigkeitsvisualisierungen für die Bauteile Abschlussdeckel und WMM sollen nun auf die folgenden beiden Absicherungsfälle angewendet werden:

Über die Entwicklersicht wird ein Motormodell eines TÜ1 Vierzylinder-Längsmotors in dem Bauzustand der Abschlussdeckelverschraubung geladen. Dazu wird die Ansicht zur Verschraubung aus der Fähigkeitsvisualisierung des Abschlussdeckels über Doppelklick auf die Ansicht Label im CAD-Strukturbaum im assoziativen Bauteil geladen. Hier ist es von Vorteil, dass beide Modelle in dem gleichen Koordinatensystem erzeugt wurden, da sie nicht aneinander ausgerichtet werden müssen. Durch die Integration der Produktgruppe B48 (Baukastenmotor Vierzylinder Otto) in die Benennung der Ansicht (Kapitel 5.3.1, S. 109) ist es für die Bauteilentwickler schnell ersichtlich, mit welchen Betriebsmitteln aktuell Vierzylinder-Längsmotoren montiert werden.

Nachdem das korrekte Visualisierungsmodell geladen wurde, kann die qualitative Bewertung der Baubarkeit erfolgen. Durch Einsicht des verlinkten Videos ist direkt erkennbar, dass die Spindeln derzeit alle zeitgleich verschrauben. Bereits aus den übergreifenden Informationen der Farbgebung und Transparenz ist ersichtlich, dass einzelne Schraubpunkte mit keiner der vorhandenen Spindeln erreicht werden können (vgl. Bild 6.20). Die Schraubköpfe sind bereits passend zu den bestehenden Schraubnüssen. Ein Bauteilentwickler kann sich nun über den angefügten Link die hinterlegten Rekonfigurationsräume öffnen. In diesem Fall kann der Minimal-Rekonfigurationsraum, der in Kapitel 6.3 erstellt wurde, angewendet werden. Die definierten Anforderungen sind alle erfüllt.

Da eine weitere Anpassung zur Verbesserung der Montagegerechtheit des Bauteils in diesem Fall sehr viele Auswirkungen im gesamten Motor hätte und alle Anforderungen für einen definierten Rekonfigurationsraum erfüllt sind, entscheidet sich der Bauteilentwickler gegen eine weitere Anpassung des Bauteils. Er kann nun die detaillierte finanzielle Bewertung der erforderlichen Anpassung bei der Montageplanung beauftragen. Dabei kann er direkt den Hinweis mitsenden, welche Schraubspindeln flexibilisiert werden müssten, um die neuen Schraubpositionen zu erreichen. Die Spindelbezeichnung kann aus der Ansicht Label herausgelesen werden. Dies bewirkt einen einheitlichen Sprachgebrauch zwischen Montage und Entwicklung und kann im weiteren Verlauf auch mit dem Betriebsmittellieferanten verwendet werden. Durch die gezielte Bewertungsbeauftragung kann in diesem Fall direkt der Fokus auf die Bewertung der erforderlichen Anpassung erfolgen.



Legende:

- = mit Schraubspindeln erreichbarer Schraubpunkt
- = mit Schraubspindeln nicht erreichbarer Schraubpunkt oder kein Schraubpunkt bei vorhandener Schraubspindel

Bild 6.20: Anwendung des Visualisierungsmodells und Rekonfigurationsraums

Usage of the Visualization Model and Reconfiguration Area

Im Fall der Verschraubung des WMMs in der TÜ1 zeigt sich bei der qualitativen Bewertung mit dem Visualisierungsmodell, dass ein Schraubpunkt in dem Bauzustand des Motors durch das Ölfiltermodul so verdeckt wird, dass eine Verschraubung mit dem bestehenden Montagebetriebsmittel nicht möglich ist (Bild 6.21). Hier kann nun eine Anpassung des Bauraums zunächst produktseitig untersucht werden. Ist dies nicht realisierbar, muss die Montageplanung mit der Untersuchung beauftragt werden, wie hier eine Montage realisiert werden kann, und welche Anpassungen am Produkt oder Betriebsmittel dafür erforderlich sind. Auch in diesem Fall ist bei der Kommunikation zwischen Bauteilentwicklung und Montageplanung die Ansicht Label hilfreich. Dieser Validierungsfall zeigt den Mehrwert der Kombination der Fähigkeitsvisualisierung mit der automatischen Bauzustandserzeugung.

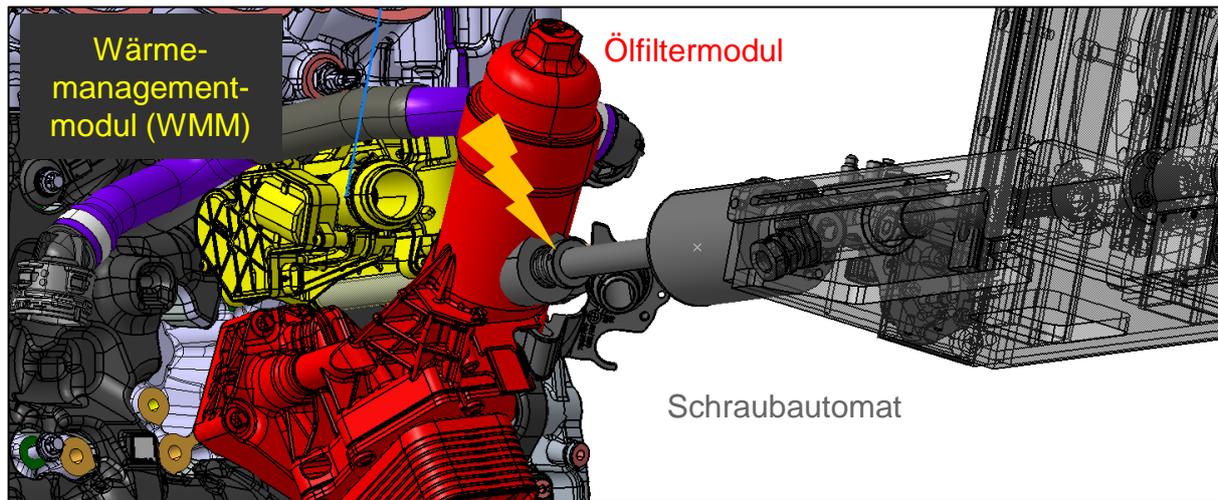


Bild 6.21: Kollision der Wärmemanagementmodul-Schraubspindel mit dem Ölfiltermodul

Collision of the Screw Spindle for the Heat Management Modules with the Oil Filter

6.5 D) Validierung der softwaregestützten Baubarkeitsprüfung

Validation of the Software Supported Assembly Check

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 6.4 manuell mithilfe der Visualisierungsmodelle überprüften Absicherungsfälle mittels der Methodik zur softwaregestützten Baubarkeitsprüfung untersucht.

6.5.1 Vorbereitung der Betriebsmittelmodelle und Fähigkeitserfassung

Preparation of the Resource Models and Capturing of Capabilities

In Kapitel 5.4.1 wird keine exakte Vorgabe gemacht, wie Kinematiken abzubilden sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde bei der BMW Group eine Software entwickelt, die auf der Entwicklungsumgebung ‚Unreal Studio‘ basiert. Wie in Bild 6.3 dargestellt, können die Betriebsmittelmodelle aus Schritt 1 der Visualisierungserstellung nun verwendet werden, um je Baugruppe die Kinematiken zu hinterlegen. Hierfür wurde ein Plugin für Unreal Studio entwickelt, mit dem sich an die Geometrien der Betriebsmittel Koordinatensysteme einfügen lassen, in denen die Bewegungsinformationen gemäß der Bewegungsrelationsmatrix hinterlegt werden. Je Eintrag in der Bewegungsrelationsmatrix werden dafür die Art der Kinematik, die kinematischen Freiheitsgrade inklusive mechanischer Endanschläge sowie die Art der Baugruppe (Bewegungsbaugruppe, Prozessbaugruppe, Endeffektor) ermittelt.

Die Stationskonfiguration mit dem Plugin wird bereits in Bild 5.20 detailliert gezeigt. Die Betriebsmittel-Simulationsmodelle werden mit dem Plugin in Unreal Studio als *.pak-Datei (Package-Datei) verpackt und können in der Datenbank bei dem Objekt Betriebsmittel oder Station hinterlegt werden.

Zusätzlich zu den kinematischen Freiheitsgraden müssen für die Eignungsprüfung bestimmte Informationen aufgenommen werden. Die Validierung erfolgt anhand der beschriebenen Schraubfälle. Bei Schraubprozessen werden für die Eignungsprüfung des Betriebsmittels bei der Prozessklassifizierung die Fähigkeitsparameter aus Tabelle 6.2 hinterlegt.

Die Fähigkeiten werden in der Datenbank zu der jeweiligen Betriebsmittelbaugruppe hinterlegt und können somit bei der Simulation und dem Parameterabgleich verwendet werden. Im vorliegenden Validierungsfall muss lediglich der Zustellweg für die Simulation, der Drehmomentbereich und die Toleranz der Schraubspindeln hinterlegt werden. Alle anderen Parameter werden aus der Simulation ermittelt. Sämtliche Schraubspindeln sollen bei der Erreichbarkeitsprüfung über einen Weg von 10 mm simulativ untersucht werden. Für die Validierung wird als Toleranz um die Schrauberrnuss ein Millimeter angegeben. Die Schrauber können zwischen 8 und 32 Nm verschrauben.

6.5.2 Automatisierte Erfassung von Produktanforderungen

Automated Capturing of Product Requirements

Im nächsten Schritt werden die Produktanforderungen erfasst. Dies sind bei einem Schraubprozess einerseits die Position und Ausrichtung der Schrauben und andererseits der Schraubkopftyp und das Nenndrehmoment sowie die Schraubklasse. Es muss zunächst der Bauzustand mit dem Dressleveltool erstellt werden. Dieser kann als *.cgr-Datei aus CATIA exportiert, mit dem Dateikonverter Datasmith von Unreal Studio in eine *.pak-Datei verpackt und in das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Assembly Check Tool (ACT) importiert werden. Das ACT bildet den Kern der Baubarkeitsprüfung und die Benutzeroberfläche für die Anwender.

In dem ACT werden im Anschluss die zu testende Station sowie der zu testende Motor im entsprechenden Bauzustand ausgewählt. Mittels des in Kapitel 5.4.2 beschriebenen Feature Engineering Algorithmus wird der Motor nach Schrauben durchsucht. Hierzu wählt der Nutzer das Bauteil aus, das in dem Prozessschritt verschraubt werden soll. Dies dient lediglich zur Eingrenzung der Suche. Daraufhin vergleicht der Algorithmus jedes an das Bauteil angrenzende Bauteil mit den bekannten Schrauben aus der Schraubendatenbank und hinterlegt ähnliche Bauteile im Zwischenspeicher. Das Ergebnis wird dem Nutzer angezeigt. Wurden einzelne Schrauben nicht erkannt, oder Bauteile als Schrauben erkannt, die keine Schrauben sind, können diese der Software als Schrauben oder Fehler angelernt werden. Durch diese Lernfunktion wird die Genauigkeit der Schraubenerkennung mit jeder neuen Ausführung erhöht. Bild 6.22 stellt die Anzeige der gefundenen Schrauben in der Software ACT dar. Es wurden alle elf Schrauben der Abschlussdeckelverschraubung als Schrauben vom Typ Screw0001 erkannt.

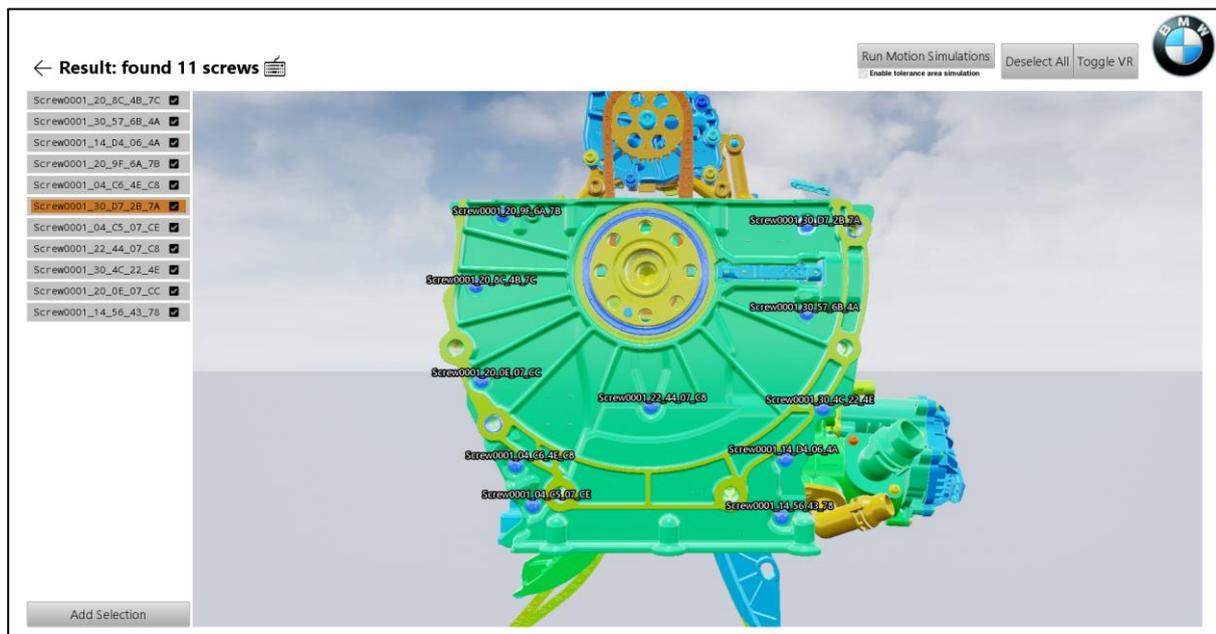


Bild 6.22: Gefundene Schrauben in dem AssemblyCheckTool

Screws Found in the AssemblyCheckTool

In Kapitel 5.4.3 wurde beschrieben, dass die Parameter für die Eignungsprüfung mittels Datenbankabgleich oder über erweiterte Funktionalitäten abgeglichen werden können. Der erläuterte Algorithmus zur Erkennung von Schraubkopftypen und zum Abgleich mit Schrauberbits oder Schraubnüssen anhand von Bildabgleichen wurde in der Software ACT umgesetzt. Die Programmierschnittstellen und Funktionsbibliotheken der Entwicklungsumgebung von Unreal Studio konnten dabei zum Beispiel dafür genutzt werden, um mit virtuellen Kameras Bilder zu erzeugen, die Ausgangslage für die Analyse sind.

Das Drehmoment kann nicht geometrisch ermittelt werden und muss deshalb manuell in der Datenbank hinterlegt werden. Im Fall der Abschlussdeckelverschraubung beträgt das Nennmoment 22 Nm bei einer Verschraubklasse 2, also einer erlaubten Abweichung von +/- 7% des Nennmoments.

6.5.3 Dreistufiger Abgleich von Anforderungen und Fähigkeiten und Aufbereitung der Baubarkeitsprüfungsergebnisse

Three-Step Comparison of Requirements and Capabilities and Processing of the Assembly Check Results

Die Bewertung der Baubarkeit kann nun automatisiert erfolgen. Dazu wird in dem Fenster in Bild 6.22 oben rechts der Knopf *Run Motion Simulations* ausgewählt. Zuvor kann über das Setzen eines Hakens bei dem Eintrag *Enable tolerance area simulation* bestimmt werden, ob die Toleranzbereiche der Schrauber mitberücksichtigt werden sollen. Die Erreichbarkeit wird anhand des in Bild 5.24 dargestellten Algorithmus ermittelt und auch die Zugänglichkeit wird simulativ untersucht. Abschließend wird die

Passung der Schrauben mit den Endeffektoren untersucht. Das Ergebnis der Baubarkeitsprüfung wird wie in Bild 6.23 dargestellt tabellarisch aufbereitet. Wenn eine Lösung gefunden wird, wird in der Spalte *Nutrunner* angezeigt, mit welchem Endeffektor die Schraube erreicht wird.



← **Motion simulation results:**

6 screws OK, 5 not reachable

Screw ID	Screw Type	Nutrunner	Out of range	Interference	Matched	Ok
Screw0001_14_56_43_78	Screw0001		Yes	-	No	No
Screw0001_30_4C_22_4E	Screw0001		Yes	-	No	No
Screw0001_04_C5_07_CE	Screw0001		Yes	-	No	No
Screw0001_04_C6_4E_C8	Screw0001		Yes	-	No	No
Screw0001_14_D4_06_4A	Screw0001		Yes	-	No	No
Screw0001_20_8C_4B_7C	Screw0001	StationNutrunner 3	No	No	Yes	Yes
Screw0001_30_57_6B_4A	Screw0001	StationNutrunner 4	No	No	Yes	Yes
Screw0001_20_9F_6A_7B	Screw0001	StationNutrunner 1	No	No	Yes	Yes
Screw0001_30_D7_2B_7A	Screw0001	StationNutrunner 2	No	No	Yes	Yes
Screw0001_22_44_07_C8	Screw0001	StationNutrunner 7	No	No	Yes	Yes
Screw0001_20_0E_07_CC	Screw0001	StationNutrunner 6	No	No	Yes	Yes

Save report as XML file

Bild 6.23: Ergebnistabelle zur Auswertung der Baubarkeitsprüfung

Result Table for the Evaluation of the Assembly Check

Die Farbgebung in dieser Ergebnistabelle ist analog zu derjenigen aus Bild 5.26. Ein rotes Feld in der Erreichbarkeitsprüfung bedeutet, dass der Schraubpunkt nicht erreichbar ist, ein grünes Feld bedeutet, dass der Schraubpunkt erreichbar ist. Bei der Zugänglichkeit gibt es drei Stufen der Prüfung. Es kann sein, dass ein Schraubpunkt ohne Kollision zugänglich ist (grüner Fall). Der Toleranzbereich kann bei der Zustellung kollidieren (gelber Fall), oder die Spindel selbst kann bei der Zustellung kollidieren (roter Fall). Zuletzt kann der Schraubkopftyp zur Schraubernuss passen (grüner Fall) oder nicht (roter Fall). Ist die Erreichbarkeit nicht gegeben, wird keine Zugänglichkeitsprüfung oder Eignungsprüfung für das Betriebsmittel durchgeführt.

Sind alle Felder grün, ist auch der gesamte Baubarkeitsprüfungsfall in Ordnung. Es gibt also eine gültige Lösung für die Anforderungen. Ist die Zugänglichkeitsprüfung gelb, wird auch das Gesamtergebnis als gelb markiert, um dem Nutzer anzuzeigen, dass dieser Untersuchungsfall grenzwertig ist. Hier empfiehlt sich eine manuelle Untersuchung durch einen Experten. Ist eines der Felder rot, wird auch das Gesamtergebnis als rot dargestellt. In diesem Fall liegt folglich ein Baubarkeitskonflikt vor. In dem Validierungsfall der Abschlussdeckelverschraubung wurden 6 Schrauben als baubar erkannt. 5 Schrauben sind nicht erreichbar.

Die Analyse kann innerhalb der Software ACT erfolgen oder als XML-Datei exportiert werden, um in Folgesystemen verarbeitet zu werden. In der Software ACT wird jeder Simulationsfall intern gespeichert. Indem für den jeweiligen Simulationsfall der Knopf *View* ausgewählt wird, kann die Simulation am Monitor dynamisch visualisiert werden (Bild 6.24). Über den Start- und Stopp-Knopf kann jederzeit die Simulation neu gestartet oder angehalten werden. Dabei können Videos aus frei wählbaren Perspektiven aufgenommen werden, die zur Erläuterung von Baubarkeitskonflikten an Bauteilentwickler oder Anlagenlieferanten übergeben werden können. Für eine detailliertere Analyse ist es auch möglich die Simulationsfälle mit einer VR-Brille (Virtuelle Realität) zu untersuchen. Für die Software ACT sind keine besonderen Systemvoraussetzungen erforderlich, sodass sie auch auf nicht eigens für CAD-Software ausgelegten Rechnern ausgeführt werden kann.

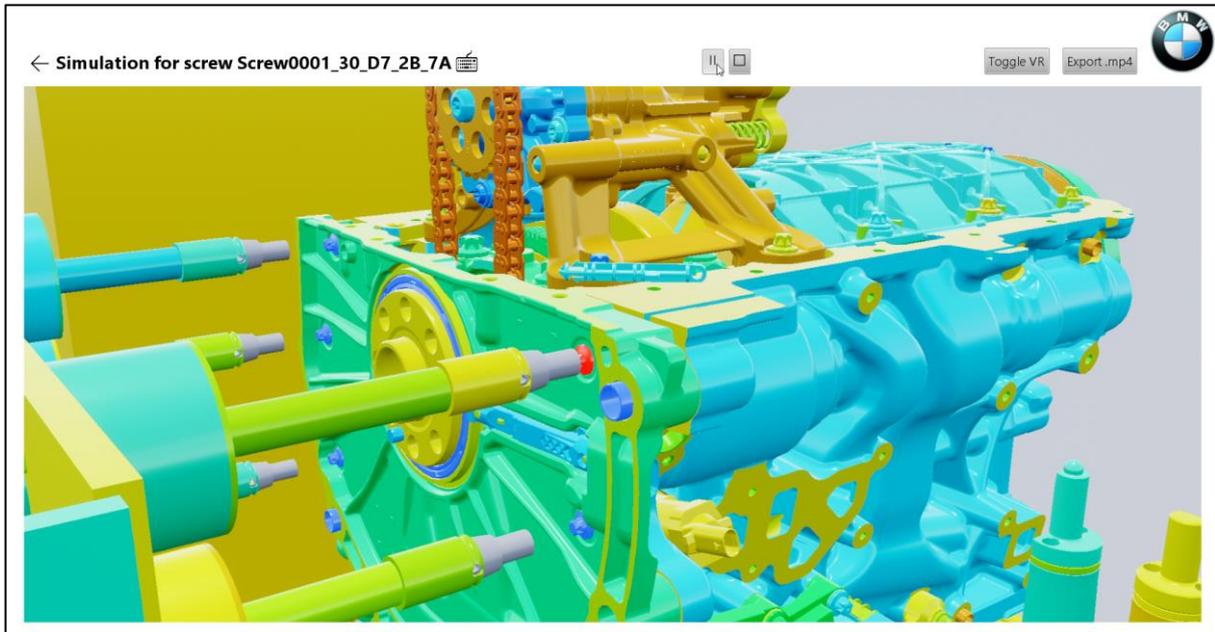


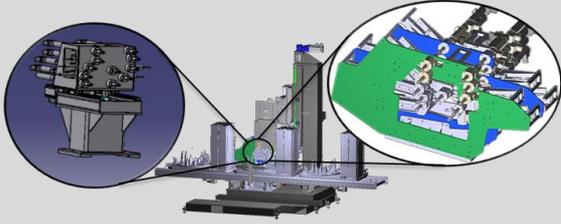
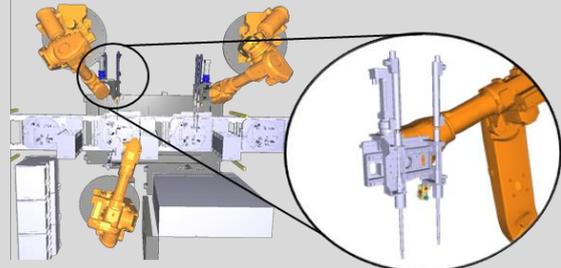
Bild 6.24: Simulation eines erreichbaren Schraubfalls

Simulation of a Reachable Screw Joint

In der Software ACT wurde der Abgleich der Drehmomentinformationen nicht berücksichtigt. Der XML-Export kann jedoch in die Absicherungsdatenbank importiert werden und dort um den Drehmomentabgleich ergänzt werden. Dieser kann wie bei MÜLLER ET AL. [MÜLL15] erfolgen und muss folglich nicht weiter erläutert werden.

Die Baubarkeitsprüfung mittels ACT erfolgt bei den elf Schrauben der Abschlussdeckelverschraubung in 1 Minute und 16 Sekunden. Die gleiche Detaillierungsstufe einer Erreichbarkeits- und Zugänglichkeitsprüfung, sowie einer Eignungsprüfung des Betriebsmittels braucht bei manueller Prüfung ca. ½ Stunde (Expertenschätzung). Somit kann mit der automatisierten Baubarkeitsprüfung eine Beschleunigung des Prozesses erreicht werden. Zudem müssen durch die einfache Nutzeroberfläche von ACT die Baubarkeitsprüfungen nicht von Experten durchgeführt werden, was einerseits Kosten und andererseits Schnittstellen und Zeit- und Abstimmnaufwand spart.

Die beschriebene Baubarkeitsprüfung der Schraubprozesse wurde zur Validierung der Methodik für die in Bild 6.25 gezeigten Fälle durchgeführt. Es wurde jeweils der TÜ0- und TÜ1-Motor auf der bestehenden Schraubstation im passenden Bauzustand untersucht. Das Gesamtergebnis der Untersuchungen der TÜ0-Motoren enthielt keinen Baubarkeitskonflikt.

Montageprozess	Geometrische Absicherung	
Abschlussdeckel verschrauben  Flexibilisierung von 5 Schraubspindeln von Tü0 zu Tü1		
	Motor Tü0	Motor Tü1
RDA210 Tü0	i.O.	Erreichbarkeit n.i.O.
RDA210 Tü1	i.O.	i.O.
Wärmemanagementmodul verschrauben  Geänderte Vorrangfolge von Tü0 zu Tü1		
	Motor Tü0	Motor Tü1
RDA400	i.O.	Zugänglichkeit n.i.O.
RDA180	i.O.	i.O.

Legende:

Tü = Technische Überarbeitung i.O. = in Ordnung n.i.O. = nicht in Ordnung

Bild 6.25: Übersicht über die Validierungsfälle bei der Baubarkeitsprüfung

Overview of the Validation Cases of the Assembly Check

Fünf der elf Schraubpunkte des Tü1-Motors auf der Abschlussdeckelverschraubung sind nicht erreichbar, weshalb sich hier ein negatives Gesamtergebnis ergibt. Die Passung der Schraubkopftypen zu den vorhandenen Schraubnüssen ist aber gegeben. In der Praxis wurde sich in diesem Fall für eine Flexibilisierung der Schraubspindeln entschieden (vgl. Rekonfigurationsraum). Die umgebaute Schraubstation wurde ebenfalls für die Baubarkeitsprüfung aufbereitet (Kinematisierung und Speicherung als *.pak). Mit dieser Station wurde erneut der Tü0- und Tü1-Motor untersucht. Das Ergebnis enthielt keine Baubarkeitskonflikte mehr. Somit lässt sich mit der neuen Station sowohl der Tü0- als auch der Tü1-Abschlussdeckel verschrauben.

Bei der Verschraubung des Tü1-WMMs kommt es zu einer Kollision einer Schraubspindel mit dem Ölfiltermodul bei der Zugänglichkeitsprüfung (interference). Dieses Ergebnis ist bedingt durch den Bauzustand in der Station. Durch eine Verlagerung der WMM-Verschraubung in eine frühere Station (RDA180) konnte dieser Konflikt in der Praxis behoben werden. Gleiches lässt sich durch die softwaregestützte Bau-

baubarkeitsprüfung mit ACT ermitteln. Der Bauzustand des Motors beinhaltet an der Station RDA180 noch kein Ölfiltermodul. Auf diesem neuen Schraubbetriebsmittel ist das Baubarkeitsprüfungsergebnis positiv, also ohne Baubarkeitskonflikt. Der Abgleich des Drehmomentbereichs über einen Parametervergleich ist zudem erfolgreich. Da sich keine Änderung der Schraubvorgaben durch die Entwicklung ergeben hat, können in den neuen Schraubstationen die gleichen Schraubspindeln verwendet werden, wie in den vorhandenen Stationen. Durch die Prüfung der TÜO-Motoren auf der neuen Schraubstation RDA210 sowie mit der geänderten Vorrangfolge an der Station 180 ist zudem abgesichert, dass die Baubarkeit der bereits auf der Montagelinie integrierten Motoren weiterhin gegeben ist.

6.6 Diskussion und Methodenkritik

Discussion and Method Critique

Die Validierung zeigt die Funktionsweise der entwickelten Methoden und Modelle. Zudem kann grundsätzlich die Wirksamkeit der Maßnahmen bestätigt werden. Rekonfigurationsräume lassen sich definieren, die Betriebsmittelfähigkeiten sind visualisiert und nach Entwicklungslogik strukturiert und mit der Software ACT werden alle Baubarkeitskonflikte softwaregestützt erkannt.

6.6.1 Untersuchung der Anforderungserfüllung

Examination of the Fulfillment of the Requirements

In diesem Kapitel werden abschließend systematisch die Erkenntnisse der Validierung verwendet, um die Erfüllung der Anforderungen zu untersuchen.

A1 Strukturierung der Prozesse und Betriebsmittel

Es wurde eine Methodik entwickelt, mit der sich die Prozesse und Betriebsmittel klassifizieren lassen. Anhand der Motormontage der BMW Group wurde nachgewiesen, dass durch eine einmalige Beschreibung produktrelevanter Betriebsmittelfähigkeiten und technischer Lösungen des Anlagenbaus eine hohe Wiederverwendung von Methoden zur geometrischen Absicherung ermöglicht wird. Die Montageprozesstypen und Betriebsmittelbezeichnungen werden sowohl bei der Visualisierung der Betriebsmittelfähigkeiten als auch der softwaregestützten Baubarkeitsprüfung verwendet und Rekonfigurationsräume werden mit den Bauteilart-Prozessen verknüpft. Die Klassifizierungen stellen somit eine wesentliche Basis zur Verlinkung der verschiedenen Lösungsbausteine dar. Durch die Ergänzung der Modelle um eine Methode zur Erstellung der Klassifizierung ist diese auch übertragbar auf andere Technologien außerhalb der Motormontage. Die Anforderung A1 ist folglich erfüllt. Der Initialaufwand und das benötigte Expertenwissen bei der Erstellung der Klassifizierung ist erheblich.

A2 Zentrales Datenmodell zur Verknüpfung von Metainformationen über Produkte, Prozesse und Betriebsmittel

Wesentlicher Mehrwert des Datenmodells ist die logische und effiziente Datenhaltung. Nicht alle Datenobjekte lassen sich auf Parameterwerte zurückführen, weshalb hier neben einer relationalen Datenbank die Integration der Ablage von CAD- und Simulationsmodellen entscheidend ist. Im Validierungsfall wird durch Erstellung der *.pak-Dateien ein einheitliches Konzept zur Speicherung von Simulationsinputdaten verwendet. Die wesentlichen Fragen der Datenhaltung sind mit dem beschriebenen Datenmodell beantwortet. Für jeden weiteren Anwendungsfall müssen aber die unternehmensspezifisch bereits vorliegenden Systeme und Datenhaltungsformen berücksichtigt werden. Durch die Erweiterung des etablierten Modells nach MÜLLER ET AL. [MÜLL15] können insbesondere Produkthanforderungen und Fähigkeiten detaillierter aufgenommen werden und die Einteilung der Betriebsmittel realitätsnäher abgebildet werden. Diese Erweiterungen sind Grundlage für die erfolgreiche Ausgestaltung der Lösungsbausteine und der automatisierten Bauzustandserzeugung. Das Datenmodell ermöglicht darüber hinaus die Abbildung von Szenarien. Die Forschungslücke zu A2 kann folglich als geschlossen angesehen werden.

A3 Automatische Erzeugung von Bauzuständen des Produktes

Die automatisierte Bauzustandserzeugung profitiert wesentlich von einer einheitlichen Datenhaltung der Verbauorte von Bauteilen im Datenmodell. Die Bauzustandserzeugung ist wie gefordert in CAD-Konstruktionssystemen und CAD-Viewern verwendbar und steht somit für diverse Folgeprozesse zur Verfügung. Neben dem reinen Stützen auf exakten Zuordnungen von Bauteilen zu Verbauorten werden Interpretationsalgorithmen entworfen, die eine Abschätzung von Verbauorten mit Anzeige der Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit der Daten ermöglichen. Dies ist entscheidend für die Anwendbarkeit schon in der frühen Produktentwicklungsphase. Bauteilkonstrukteure gelangen so in Besitz von montagerelevanten Informationen auch für neue Produkte, was deren Berücksichtigung vereinfacht (vgl. Kapitel 2.1.4). Hier besteht ein Risiko, dass die systematisch abgeschätzten Verbauorte nicht korrekt sind und fehlerhafte Schlussfolgerungen in den Folgeprozessen bewirken. Mit der farblichen Einteilung der Bauteile nach Wahrscheinlichkeit der Korrektheit des zugewiesenen Verbauortes soll das Verständnis der Nutzer für die Verlässlichkeit der Daten gestärkt werden. Im vorliegenden Fall wurde sich für eine detaillierte farbliche Einordnung entschieden. Zur Vereinfachung der Interpretation können einzelne Fälle auch zusammengefasst werden, sodass zum Beispiel nur drei Farben (z.B. rot, gelb, grün) unterschieden werden. Mit der entwickelten Methode wird der Aufwand zur Bauzustandserzeugung deutlich reduziert. Zudem werden einheitliche Bauzustände für die Folgeprozesse angenommen. Dies kann Missverständnisse in den Folgeprozessen vermeiden. Auch die Forschungslücke zu A3 ist somit geschlossen.

Die drei definierten Basisanforderungen können folglich als erfüllt betrachtet werden (Tabelle 6.5). Sie sind insbesondere durch ihre stark allgemeingültige Ausrichtung für diverse Folgeprozesse wiederverwendbar.

Tabelle 6.5: geschlossene Forschungslücke zu Handlungsziel A

Closed research gap for acting target A

Kapitelnummer:		5.1.1			5.1.2	5.1.3
		Prozessklassifizierung	Betriebsmittelklassifizierung	Methode zur Erstellung der Klassifizierungsmodelle	Datenmodell	Dressleveltool inkl. Schlüsselwortmethode
Nr.	Anforderung					
A1	Strukturierung der Prozesse und Betriebsmittel		●		○	○
A2	Zentrales Datenmodell zur Verknüpfung von Metainformationen über Produkte, Prozesse und Betriebsmittel		○		●	○
A3	Automatische Erzeugung von Bauzuständen des Produktes		○		○	●

○ = nicht erwähnt ◐ = erwähnt ◑ = relevant ◒ = teilweise erfüllt ● = erfüllt

Die Erfüllung der Anforderungen an die Definition von Rekonfigurationsräumen kann wie folgt bewertet werden (Tabelle 6.6).

B1 Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen

Die Auswahl der zu betrachtenden Stationen und Betriebsmittel für die Erstellung von Rekonfigurationsräumen anhand der zwei Dimensionen Stationsflexibilität und Produktänderung ermöglicht die geforderte Reduzierung des Aufwandes durch starke Einschränkung des Betrachtungsraumes in der Vorentwicklung. Die Fokussierung auf einzelne Stationen erlaubt die Verdichtung der Informationen im Folgeschritt, sodass die Zielsetzung der Anforderung B1 erreicht wurde.

B2 Definition von Rekonfigurationsräumen für die Produktgestaltung

Die Definition neuer Rekonfigurationsräume wird ausgelöst durch neue Produktkonzepte. Damit ist eine frühe Vernetzung von Montageplanung und Vorentwicklung gefordert. Bei der Entwicklung neu entwickelter Montageprozesslösungen wird die Produktionsstrategie des Unternehmens berücksichtigt, sodass nur realistisch umsetzbare Maßnahmen entwickelt werden. Wesentlich ist die Darstellung von Optionen: die Unterscheidung des erweiterten und des eingeschränkten Rekonfigurationsraumes erlaubt die Betrachtung von verschiedenen Szenarien und führt nicht zu einer vollständigen Einschränkung des Produktlösungsraumes. Zudem wird aber durch die Ableitung von Anforderungen zur Reduzierung der Integrationskosten frühzeitig die Auswirkung von Produktänderungen transparent gemacht. So lassen sich Restriktionen und Freiheitsgrade für die Bauteilentwicklung ableiten.

Die entwickelte Methode zur Entwicklung von Rekonfigurationsräumen ermöglicht einen Interessensausgleich zwischen geringem Aufwand für die Montageplanung in der Vorentwicklung bei Betrachtung unreifer Produktkonzepte und hohem Nutzen für die Vorentwicklung durch konkrete Optimierungsmaßnahmen.

Bei der Definition des Minimalkonzeptes und der Ableitung der erforderlichen Anforderungen ist ein vernünftiges Maß der Einschränkung des Produktkonzeptes zu wählen. Wäre als Anforderung formuliert worden, dass keine Anpassung der Schraubpunkte stattfinden darf, hätte dies den produktseitig formulierten Auswirkungen widersprochen. Dies hätte dazu führen können, dass eine Änderung des Kettentriebs von Anfang an für nicht realisierbar gehalten würde. Mit der Formulierung realistischer Anforderungen werden Möglichkeiten aufgezeigt, die eine deutliche Kostenreduzierung bei vertretbarer Produkteinschränkung ermöglichen. Die Formulierung geeigneter Anforderungen erfordert eine sehr gute Kenntnis des Produktionssystems und einen hohen Erfahrungswert bei der Einschätzung von Änderungskosten und zu den Änderungsmöglichkeiten in der Produktentwicklung.

Rekonfigurationsräume ermöglichen in späteren Entwicklungsphasen schnellere Integrationen, weil Produkte bereits von Beginn an montagegerechter entwickelt werden. Die Validierung der Rekonfigurationsräume wurde anhand von bereits integrierten Produktumfängen durchgeführt. Es liegt in ihrer Natur des frühen Einsatzes in der Vorentwicklung, dass eine Validierung des tatsächlichen Nutzens mehrere Jahre in Anspruch nähme, was im Rahmen dieser Arbeit nicht realisierbar ist. Es besteht jedoch allgemeiner Konsens in der Literatur, dass eine frühe Vernetzung von Montageplanung und Entwicklung zu einer montagegerechteren Produktgestaltung führt. Die entwickelte Methode ist einerseits sehr lösungsoffen und andererseits methodisch sehr systematisch aufgebaut, sodass ein konsequenter Einsatz dieser Methode in der unternehmerischen Praxis leicht realisierbar ist. Zusammenfassend kann die Anforderung B2 als erfüllt angesehen werden.

Tabelle 6.6: geschlossene Forschungslücke zu Handlungsziel B*Closed research gap for acting target B*

Kapitelnummer:		5.2.1		5.2.2		
Nr.	Anforderung	Bewertung der Stationsflexibilität	Steckbrief Produkt-änderung und Ermittlung betroffene Betriebsmittel	Methode zur Definition der Rekonfigurationsräume (erweitert & eingeschränkt)	Einschränkung auf unternehmensstrategische Szenarien	Ableitung von Bauteilanforderungen zur Minimierung des Rekonfigurationsraums
B1	Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen	●			○	
B2	Definition von Rekonfigurationsräumen	○			●	

○ = nicht erwähnt ◐ = erwähnt ◑ = relevant ◒ = teilweise erfüllt ● = erfüllt

Durch die Erfüllung der folgenden vier Anforderungen wird die intuitiv verständliche Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten in der „Sprache des Entwicklers“ [STEG10, S. 30] erreicht (Tabelle 6.7):

C1 Modell zur intuitiv verständlichen Visualisierung

Die intuitive Anwendung der Modelle ist durch verschiedene Aspekte realisiert. Erstens werden die Modelle so aufgebaut, dass die Denkweise der Bauteilentwickler aufgegriffen wird. Die Modelle werden folglich nicht primär nach Montageprozessreihenfolgen und -stationen sortiert und benannt, sondern die Benennung und Strukturierung erfolgt nach Bauteilart-Prozessen. Durch den standardisierten Aufbau analog zu dem 3D-Master-Prozess und die wiederverwendbaren Visualisierungsregeln finden sich Bauteilentwickler schnell auch in neuen Modellen zurecht. Bei der Erstellung der Visualisierungsregeln wurde auf die grundlegende Wirkung von Farben und Formen geachtet (vgl. Kapitel 3.3.1). Dies wird weiter gefördert durch die Erstellung verschiedener Ansichten, in denen jeweils nur ein Teil der Informationen dargestellt wird. Dadurch wird die Fokussierung auf wesentliche Informationen möglich. Die Validierung zeigt, dass mit den Visualisierungsmodellen ein qualitativer, visueller Abgleich von Produktanforderungen und Betriebsmittelfähigkeiten auch ohne vertieftes Fachwissen über die Montageprozesse ermöglicht wird.

Durch die einheitliche Benennung der Betriebsmittelkomponenten wird darüber hinaus eine Verständigungsgrundlage für den Austausch über Montageprozesse zwischen Entwicklung und Montageplanung geschaffen. Die Voraussetzungen für die Erfüllung der Anforderung C1 sind somit erfüllt.

C2 Identifikation produktrelevanter Darstellungsinhalte

Das Regelwerk ist so aufgebaut, dass die Visualisierungsregeln in Abhängigkeit der Montageprozessstypen definiert sind. Somit können einmalig die relevanten Inhalte für die montagegerechte Produktgestaltung definiert werden. Dies erfolgt in einem Expertengremium unternehmensspezifisch. Bei der Visualisierung der kinematischen Bewegungsmöglichkeiten werden nicht nur die aktuellen Verfahrswege dargestellt, sondern die mechanischen Freiheitsgrade modelliert. Darüber hinaus werden zudem die Rekonfigurationsräume angehängt, sodass bei der Bauteilkonstruktion auch Auswirkungen von Verletzungen der Betriebsmittelfähigkeiten abgeschätzt werden können. Dies führt zu größerer Akzeptanz und der tatsächlichen Modellanwendung in der Produktentwicklung. Die Visualisierung dient so als zentraler Ausgangspunkt für alle produktrelevanten Betriebsmittelfähigkeiten und das produktrelevante Montageprozesswissen. Folglich ist die Forschungslücke zu C2 geschlossen.

C3 Produktkompatible Visualisierungsmodelle der Betriebsmittelfähigkeiten

Die Methodik erlaubt eine Erstellung und Anwendung der Visualisierungsmodelle in CAD-Konstruktionssystemen. Im Validierungsfall werden die Visualisierungsmodelle in CATIA V5 erstellt. Dies entspricht der Konstruktionssoftware der Bauteilentwickler bei der BMW Group. Somit ist eine Realisierung in der „Sprache des Entwicklers“ [STEG10, S. 30] gegeben. Grundsätzlich ist hier anzumerken, dass einzelne Funktionen gegebenenfalls andersartig zu realisieren sind. Beispielsweise kann es sein, dass ein verwendetes CAD-System keine assoziativen Bauteile unterstützt. In diesem Fall sind technisch andere Lösungen zu finden. Bei der Erstellung der Visualisierungsregeln wurde jedoch grundsätzlich auf die Übertragbarkeit der Regeln auf verschiedene Softwarelösungen geachtet. Damit sind die Probleme, die der Anforderung C3 zugrunde liegen, gelöst.

C4 Regelwerk zur strukturierten Erstellung der Visualisierungsmodelle

Das Vorgehensmodell zur Erstellung der Visualisierungsmodelle ist in weiten Teilen unabhängig von Expertenwissen. So können die Isolation der Baugruppen in CAD und die Identifikation von Abhängigkeiten sowie die Anwendung der prozessübergreifenden Visualisierungsregeln unabhängig von Experten-Know-How erfolgen. Bei der detaillierten Visualisierung der Fähigkeitsvisualisierung in Abhängigkeit des Montageprozessstypen, der Verlinkung von Zusatzinformationen sowie der Visualisierung des exemplarischen Prozessablaufs ist teilweise tiefes Expertenwissen gefordert, um den maximalen Nutzen für die montagegerechte Produktbeeinflussung zu erzielen. Einige Verlinkungen wie zum Beispiel zu Rekonfigurationsräumen können jedoch direkt aus

der Datenbank eingefügt werden. Die Ansichten können wiederum mit geringem Prozesswissen erstellt werden. Gleiches gilt für die Veröffentlichung.

Um eine effiziente Anwendung der Visualisierungsmodelle zu ermöglichen, muss viel Zeit in die Erstellung der Modelle investiert werden. Insbesondere die Erstellung der Modellstruktur und das Zusammentragen der Detailinformationen kann sehr aufwändig sein. Andererseits werden die einmal aufbereiteten Modelle auch für die softwaregestützte Baubarkeitsprüfung weiterverwendet und durch das Regelwerk muss nicht für jede neue Visualisierung eine neue Visualisierungsform gefunden werden. So wird auch eine Vergleichbarkeit der Montagebetriebsmittel in verschiedenen Montagelinien ermöglicht. Sind die Modelle einmal erstellt, erlauben sie ein schnelles Verständnis der Montageprozesse sowie der daraus resultierenden Freiheitsgrade und Restriktionen für das Produkt. Sie sind eine intuitiv anwendbare und wirksame Unterstützung bei der Produktbeeinflussung, weil sie einerseits den Bauteilentwicklern ermöglichen, selbstständig die Montagegerechtheit ihres Produktes grob zu beurteilen. Andererseits sind sie ein Hilfsmittel für Montageplaner, um die Auswirkungen von Produktänderungen im Montageprozess schnell und leicht verständlich für Entwicklungsingenieure darzustellen. Durch das Regelwerk werden folglich die Voraussetzungen für die Schließung der Forschungslücke zu C4 erfüllt.

Tabelle 6.7: geschlossene Forschungslücke zu Handlungsziel C*Closed research gap for acting target C*

Kapitelnummer:		5.3.1						5.3.2	
Nr.	Anforderung	Strukturierung nach Bauteilart-Prozessen	Einsatz von Ansichten	Einheitliche Benennung der Betriebsmittelkomponenten	Visualisierung abhängig von Montageprozesstypen	Darstellung mechanischer Freiheitsgrade	Verknüpfung zu Rekonfigurationsräumen	Umsetzung der Visualisierung in CAD	Regelwerk mit Visualisierungsregeln
C1	Intuitiv verständliche Visualisierung von Betriebsmittelfähigkeiten		●			○		○	◐
C2	Identifikation produktrelevanter Darstellungsinhalte		○			●		○	○
C3	Produktkompatible Visualisierungsmodelle der Betriebsmittelfähigkeiten		○			○		●	○
C4	Regelwerk zur strukturierten Erstellung der Visualisierungsmodelle		○			○		○	●

○ = nicht erwähnt ◐ = erwähnt ◑ = relevant ◒ = teilweise erfüllt ● = erfüllt

Die Erfüllung der Anforderungen zur Entwicklung einer softwaregestützten Prüfung der Baubarkeit wird wie folgt bewertet (Tabelle 6.8).

D1 Vorbereitung der Betriebsmittelmodelle

Ziel dieser Anforderung ist insbesondere die Vorbereitung der Betriebsmittelmodelle für dynamische Untersuchungen. Durch das Anhängen der kinematischen Freiheitsgrade an das CAD-Produktmodell wird dies in einfacher Form ermöglicht. Als Eingangsgröße dafür können die Visualisierungsmodelle verwendet werden. Dort sind bereits die Freiheitsgrade hinterlegt. Entscheidend ist hier, dass die für die Visualisierung erstellte Modellstruktur wiederverwendet werden kann. Die Integration der Kinematik ist mit geringem Aufwand verbunden, sobald alle Informationen basierend auf der Klassifizierung der Prozesse und Betriebsmittel verfügbar sind. Die Methode lässt sich mit dem Datenmodell verbinden. Somit ist die Anforderung D1 erfüllt.

D2 Automatisches Finden von Produktanforderungen am CAD-Produktmodell

Die automatische Erkennung von Produktanforderungen wurde mittels Feature Engineering umgesetzt. Es konnte am Beispiel von Schraubprozessen gezeigt werden, dass mit nur einer Methode für sämtliche Montageprozessklassen zu einem Montageprozessstypen (im Validierungsfall: ‚Schrauben‘) die geometrischen Anforderungen erfasst werden können. Der Effekt durch die Klassifizierung von Montageprozessen wirkt sich folglich auch bei der softwaregestützten Baubarkeitsprüfung erheblich aus. Die Lernfähigkeit des Algorithmus führt zudem dazu, dass die Erfassungsgeschwindigkeit und -qualität der Produktanforderungen mit der Einsatzdauer der Software immer weiter erhöht werden kann. Die Forschungslücke zu D2 ist folglich geschlossen.

D3 Abgleich von Produktanforderungen mit Betriebsmittelfähigkeiten

Der Abgleich der Produktanforderungen mit den Betriebsmittelfähigkeiten erfolgt standardisiert in den drei Stufen Erreichbarkeitsprüfung, Zugänglichkeitsprüfung und Prüfung der Eignung der Betriebsmittels. Diese Methode lässt sich automatisiert in Softwaresystemen abbilden und erlaubt zudem die notwendige Lösungsoffenheit. Die Dreistufigkeit erlaubt eine Wiederverwendbarkeit der Algorithmen für die ersten beiden Stufen. Die Eignungsprüfung kann hingegen in Abhängigkeit der Montageprozessklasse stark variiert werden. Der standardisierte Aufbau der Prüfung erlaubt eine intuitive Strukturierung der Baubarkeitsprüfungssoftware. Dies wird in dem Validierungsfall mittels der Software ACT gezeigt, für deren Anwendung keine Schulungen erforderlich sind. So kann eine Baubarkeitsprüfung auch ohne Expertenwissen aus der Montageplanung und tiefere Kenntnisse in 3D-CAD-Software durchgeführt werden. Für den Parameterabgleich wird, wie in der Forschungslücke gefordert, die Methode von MÜLLER ET AL. [MÜLL15] verwendet. Damit sind die Probleme, die der Anforderung D3 zugrunde liegen, gelöst.

D4 Standardisierte Aufbereitung der Baubarkeitsprüfungsergebnisse

Die Aufbereitung der Baubarkeitsprüfungsergebnisse erfolgt gemäß der in Kapitel 5.4.4 definierten Form sowohl produktorientiert als auch prozessorientiert. Dies erlaubt Montageplanern eine schnelle Fokussierung auf die kritischen Betriebsmittelbaugruppen. Anstatt sich mit der Suche nach Baubarkeitskonflikten zu befassen, können sie ihre Kapazitäten auf die Lösung der Konflikte konzentrieren. Dabei wiederum unterstützt zusätzlich die Kommunalitäts-Heatmap, welche in dem Validierungsfall nicht weiter ausgeführt wurde. Anhand der Heatmap kann jedoch gezeigt werden, wo eine Differenzierung an montagerelevanten Produktmerkmalen erfolgt. Dies stellt eine hilfreiche Diskussionsbasis für die montagegerechte Beeinflussung des Produktes dar, die im SE-Team verwendet werden kann. Die Anforderung D4 ist somit erfüllt.

Mit der softwaregestützten Baubarkeitsprüfung kann die geometrische Absicherung massiv beschleunigt werden. Zudem wird durch die Entkopplung der Baubarkeitsprüfung von Expertenwissen eine Dezentralisierung der Baubarkeitsprüfungen ermöglicht. Dies hat erhebliches Potential, die Betriebsmittelkonstruktion zu entlasten. Auch

die Mehrfachprüfung gleicher Baubarkeitsprüfungsfälle wird vermieden, da die Ergebnisse zentral gespeichert werden und somit für jeden im Unternehmen zugänglich gemacht werden können. Auch die Prüfung großer Mengen von Baubarkeitsprüfungsfällen wird durch die erhebliche Zeitersparnis ermöglicht. So kann auch abgesichert werden, dass bei Umbauten sämtliche bereits integrierten Produkte weiterhin mit dem veränderten Betriebsmittel kompatibel sind.

Tabelle 6.8 geschlossene Forschungslücke zu Handlungsziel D

Closed research gap for acting target D

Kapitelnummer:		5.4.1	5.4.2	5.4.3	5.4.4
Nr.	Anforderung	CAD-Kinematikmodelle basierend auf Visualisierung und Klassifizierungen	Feature Engineering Algorithmus basierend auf Montageprozessstypen	Dreistufige Baubarkeitsprüfung im Assembly Check Tool (ACT)	Kommunalitäts-Heatmap mit Drilldown-Funktion Matrix Geometrieprüfung inkl. Videos der Simulation
D1	Methode zur Vorbereitung der Betriebsmittelmodelle	●	○	○	○
D2	Automatisches Finden von Produktanforderungen am CAD-Produktmodell	○	●	○	○
D3	Abgleich von Produktanforderungen mit Betriebsmittelfähigkeiten	○	○	●	○
D4	Standardisierte Aufbereitung der Baubarkeitsprüfungsergebnisse	○	○	◐	●

○ = nicht erwähnt ◐ = erwähnt ◑ = relevant ◒ = teilweise erfüllt ● = erfüllt

6.6.2 Kritische Gesamtbetrachtung

Critical Overall Consideration

Die Anwendung der entwickelten Methoden lohnt sich insbesondere bei hoch automatisierten Montageprozessen in einem standardisierten Produktionssystem und bei einer Produktfamilie mit vielen Bauteilvarianten. Bei der manuellen Ausführung von Montageprozessen ist in der Regel die Anzahl der Restriktionen deutlich geringer, sodass in einer stark manuellen Montage der Nutzen zunächst mit gezielten Anwendungsbei-

spielen zu testen ist. Bei manuellen Montageprozessen ist beispielsweise die Fügeoperation selbst, also die Bewegung des Bauteils in die Konstruktionslage von entscheidender Bedeutung. Fügekurven werden an dieser Stelle nicht betrachtet. Die Übertragbarkeit und der Optimierungseffekt auf Montageprozesse außerhalb des definierten Betrachtungsraumes aus Kapitel 1 und 2 ist nicht ausgeschlossen, wurde im Rahmen dieser Arbeit aber nicht näher untersucht.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Forschungslücken aus Kapitel 3.5 mit den entwickelten Methoden und Modellen geschlossen werden. Somit sind die an die Methodik gestellten Anforderungen aus Kapitel 2.5 erfüllt. Die entwickelten Methoden dienen insbesondere der Strukturierung der Produktbeeinflussung und geometrischen Absicherung. Dabei werden sämtliche Phasen des Produktentstehungsprozesses abgedeckt. Die Aufwände zur Aufbereitung der CAD-Modelle und Datenpflege stellen jedoch eine nicht unbeträchtliche Hürde für einen Einsatz in der unternehmerischen Praxis dar. Deshalb wird ein mehrstufiger Rolloutplan empfohlen, bei dem die Inhalte der Arbeit stufenweise in den Unternehmenskontext integriert werden. Die Reihenfolge der Umsetzung der Lösungen für die Montageprozesstypen sollte in Abhängigkeit der Effektivitätskennzahl (Tabelle 6.1) aus der Prozess- und Betriebsmittelklassifizierung erstellt werden.

Um den Nutzen der entwickelten Methoden und Modelle weiter zu steigern, könnte die Integration der einzelnen Bausteine maximiert werden. Werden beispielsweise ein Produkt und Bauteilartprozess für die softwaregestützte Baubarkeitsprüfung gewählt, kann direkt der zugehörige Bauzustand erzeugt werden. In der Systemwelt des Validierungsfalls könnten die *.pak-Dateien des Motors zudem direkt erzeugt werden. Auch die Nutzung der in der Visualisierung generierten Daten für die Simulation könnte über automatisierte Schnittstellen erfolgen. Durch die Erhöhung der Integration lassen sich folglich insbesondere Datenpflegeaufwände weiter reduzieren.

7 Fazit und Ausblick

Summary and Outlook

In diesem Kapitel werden die Forschungsfragen beantwortet. Zudem wird ein Ausblick auf weitere zu untersuchende Fragestellungen im Kontext dieser Arbeit gegeben.

7.1 Fazit

Summary

In Kapitel 6.6 wird umfassend erläutert, dass die in Kapitel 3.5 identifizierten Forschungslücken zu den definierten Anforderungen mit den entwickelten Methoden geschlossen werden. Die Anforderungen werden in Kapitel 2.5 aus den Handlungszielen abgeleitet, sodass diese als erfüllt betrachtet werden können.

Die entwickelte Methodik besteht aus den Lösungsbausteinen, die wiederum als Grundlage auf drei Basisbausteinen aufbauen. Die Basisbausteine dienen der grundlegenden Einteilung der Montageprozesse und Betriebsmittel, sowie der Struktur der Daten und der Erzeugung von Bauzuständen der CAD-Produktmodelle für die Lösungsbausteine. Die Lösungsbausteine setzen in den unterschiedlichen Phasen der Produktentwicklung an. In der Vorentwicklungsphase werden durch Definition von Rekonfigurationsräumen für ausgewählte, kritische Montagebetriebsmittel in Abhängigkeit der strategischen Produktionsziele systematisch Anforderungen an die montagegerechte Produktgestaltung abgeleitet. Bei der Produktgestaltung in der Serienentwicklung dienen diese zusammen mit CAD-Visualisierungsmodellen der bestehenden Betriebsmittelfähigkeiten als Orientierungshilfe für Bauteilentwickler und -konstrukteure zur montagegerechten Produktgestaltung.

Auch mit den entwickelten Methoden können nicht alle Baubarkeitskonflikte vermieden werden. Diese werden aber mit der softwaregestützten Baubarkeitsprüfung schneller gefunden und systematisch aufbereitet, sodass die Bewertungszeit reduziert wird und die Montageplaner sich früher auf die Behebung dieser Konflikte konzentrieren können. Darüber hinaus wird ein Teil der Produktmerkmale als baubar klassifiziert, sodass diese nicht mehr von den Montageplanern manuell untersucht werden müssen. Durch die Systematisierung der Baubarkeitsuntersuchungen und Produktbeeinflussung kann zudem die Abhängigkeit von der Sorgfalt einzelner Mitarbeiter reduziert werden, sodass die Qualität der Untersuchungsergebnisse erhöht wird und auch Sonderfälle abgedeckt werden können. Das Zusammenspiel der Methoden unterstützt insbesondere auch die Zusammenarbeit zwischen Montageplanung und Bauteilentwicklung.

Durch die Erfüllung der Handlungsziele sind die beiden Forschungsfragen vollständig bearbeitet. Einerseits wird durch die Rekonfigurationsräume und Fähigkeitsvisualisierungen eine Effektivitätssteigerung der proaktiven, montagegerechten Produktgestaltung bewirkt (Forschungsfrage 1). Andererseits wird durch die Softwareunterstützung

bei der Baubarkeitsprüfung eine Effizienzsteigerung und Standardisierung der geometrischen Absicherung erreicht, was wiederum eine Qualitätssteigerung der Aussagen über Baubarkeitskonflikte zur Folge hat (Forschungsfrage 2).

Damit können die Forschungsfragen mit ‚ja‘ beantwortet werden. Mittels der Softwareunterstützung im Produktentstehungsprozess kann sichergestellt werden, dass für die Integration neuer Produkte in bestehende Montagelinien bei zunehmender kundenrelevanter Variantenzahl Baubarkeitskonflikte vermieden sowie schneller und mit konstanter Qualität geometrisch abgesichert werden können.

7.2 Ausblick

Outlook

Die bei der Entwicklung der Methodik zur Softwareunterstützung in der proaktiven Produktgestaltung und geometrischen Absicherung von Montageprozessen entstandenen Forschungsfelder sollen hier kurz dargelegt werden.

Der Basisbaustein der Prozess- und Betriebsmittelklassifizierung kann für diverse Folgeprozesse eine entscheidende Eingangsgröße sein. Hierzu sollte untersucht werden, wie bei der Standardisierung von Montageprozessen und bei der Entwicklung neuer Lösungen zum Beispiel bei der Rekonfigurationsraumerstellung die Klassifizierungen als Katalog möglicher Lösungen genutzt werden können. So lässt sich über die Zuordnung der Bauteilartprozesse zu den Betriebsmitteln beispielsweise eine Sammlung von Betriebsmitteln aufrufen, die den gleichen Bauteilartprozess ausführen. Die Klassifizierungen können auch bei der Herstellung einer Vergleichbarkeit zwischen konkurrierenden Linien in einem Montageverbund dienen.

Weiterhin ist zu untersuchen, ob für die Bewertung grober Kostenauswirkungen von Produktänderungen in Abhängigkeit der Endeffektorklassen Standardkostensätze ermittelt werden können. Dies würde beispielsweise die Kosteneinordnung von Rekonfigurationsräumen vereinfachen.

Die Bauzustandserzeugung kann ebenfalls für weitere Folgeprozesse verwendet werden. So könnte beispielsweise bei Produktanläufen an den manuellen Montageplätzen angezeigt werden, welche Bauteile in diesem Montageschritt hinzugeführt werden und wie der Endzustand nach diesem Montageschritt aussehen muss. Das Anlernen von Mitarbeitern ließe sich somit vereinfachen. Auch für die Erstellung von Serviceanweisungen könnte die Methode mit leichter Abwandlung angewendet werden.

Bei der Baubarkeitsprüfung sind Fügeoperationen der Bauteile nicht abgedeckt. Hier bietet sich eine Verknüpfung mit Methoden der Fügekurvenerzeugung und der Simulation biegeschlaffer Bauteile an, um das Bauteilverhalten auf Produkt- und Betriebsmittelseite zu optimieren [BACK17, S. 523–524; BÖTT17, S. 1–7]. Der Aufwand für die Prüfung der Eignung der Betriebsmittel stellt den größten Aufwand bei der softwaregestützten Baubarkeitsprüfung dar. Hier müssen Methoden zur weiteren Optimierung

untersucht werden. Unter anderem muss hier die Entwicklung eines Industrie-Standardkatalogs für Betriebsmittelfähigkeiten untersucht werden. Dabei kann sich zum Beispiel an der Systematik des Vereins eCI@ss e.V. zur Strukturierung von Produktstammdaten orientiert werden [ECL@21; GRÄS15].

Einen großen Themenblock weiterführender Fragestellungen umfasst das Thema der Datenaufbereitung insbesondere der CAD-Daten von Betriebsmitteln. In der Produktentwicklung in Industriebetrieben sind bereits eine hohe Datenqualität und Datendurchdringung der Entwicklungsprozesse erreicht. Die Vielfalt der Hersteller von Montageanlagen, von kleinen bis mittelständischen Maschinenbauunternehmen, führt zu einer großen Diversität der eingesetzten CAD-Konstruktionssysteme. Deshalb nimmt die Datenaufbereitung einen großen Teil des Aufwands für den Betrieb der entwickelten Methodik ein. Es gilt zu untersuchen, wie die Aufbereitung von CAD-Simulationsmodellen möglichst effizient erfolgen kann oder wie diese zwischen Anlagenherstellern und Produzenten ausgetauscht werden können, ohne die Wissenssicherung einzelner Unternehmen zu gefährden und hohe Lizenzkosten für CAD-Konstruktionssysteme bei kleineren Unternehmen hervorzurufen. Der Fokus muss dabei auf die Identifikation von Freiheitsgraden und Restriktionen für die Erstellung der Kinematiken gelegt werden. In diesem Rahmen sollte auch eine stärkere Verknüpfung der Datenaufbereitung mit der Serienmontage untersucht werden. So können auch kleine Umbauten, Optimierungen oder Instandhaltungsmaßnahmen in die CAD-Betriebsmittelmodelle zurückgeführt werden.

Gleiches gilt für die Aktualisierung der Stammdaten in der Datenbank. So müssen beispielsweise Umtaktungen einzelner Arbeitsinhalte aus der Serienproduktion zurückgespielt werden, um eine aktuelle Planungsbasis zu haben und beispielsweise die Bauzustände korrekt zu erzeugen.

Ist die Sammlung aller relevanten Informationen zu Betriebsmitteln an einem zentralen Ort gesichert, können Folgeprozesse bedarfsgerecht die Informationen verwenden, die für den Prozess erforderlich sind. So könnten die CAD-Daten beispielsweise auch für eine virtuelle Inbetriebnahme weiterverwendet werden.

In der Validierung der vorliegenden Arbeit werden die einzelnen Lösungsbausteine über aufwändige Schnittstellen oder manuell miteinander verknüpft. Die grundsätzliche Funktion kann so nachgewiesen werden. Eine Erhöhung der Durchgängigkeit der verwendeten Systeme ist für einen Produktiveinsatz ausschlaggebend, da so eine erhebliche Aufwandsreduzierung erzielt werden kann.

Abschließend soll festgestellt werden, dass die entwickelte Methodik zur Softwareunterstützung in der proaktiven Produktgestaltung einen wesentlichen Beitrag zur effektiveren Kommunikation zwischen Montageplanung und Entwicklung darstellt. Zudem wird mit der softwaregestützten Baubarkeitsprüfung eine effizientere geometrische Absicherung von Montageprozessen ermöglicht. Die Lösungsbausteine optimieren somit die Zusammenarbeit von Montageplanung und Entwicklung an den wesentlichen Schwachstellen des Entwicklungsprozesses.

8 Literaturverzeichnis

References

- [ABE14] Abe, P.; Klaus, J.; Simons, S.: *Virtuelle Inbetriebnahme: 3D-Simulation einer Montageanlage mittels Tecnomatix Process Simulate*, In: Purschwitz, A.; Hartstock, A.; Schneider, R. (Hrsg.): Tagungsband AALE 2014: Das Forum für Fachleute der Automatisierungstechnik aus Hochschulen und Wirtschaft, München, DIV - Deutscher Industrieverlag, 2014 (Bd. 11), S. 185–194
- [ABOU06] Abouel Nasr, E.; Kamrani, A.: *A new methodology for extracting manufacturing features from CAD system*, In: Computers & Industrial Engineering (Bd. 51), H. 3, S. 389–415
- [ARNO05] Arnold, V.; Dettmering, H.; Engel, T. et al.: *Product Lifecycle Management beherrschen*, Dordrecht, Springer, 2005
- [AUTO05] AIAG Automotive Industry Action Group: *SASIG Digital Engineering Visualization*, Internet, 04.02.2019, (<https://www.aiag.org/store/publications/details?ProductCode=D-21>)
- [BACH10] Bacher, J.; Pöge, A.; Wenzig, K.: *Clusteranalyse: Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren*, 3. Aufl., München, Oldenbourg, 2010
- [BACK12] Backhaus, J.; Hüttner, S.; Krug, S. et al.: *Wandlungsfähige Montagesysteme durch funktionsorientierte Modularisierung*, In: ZWF - Zeitschrift für den wissenschaftlichen Fabrikbetrieb (Bd. 107), H. 5, S. 339–343
- [BACK15a] Backhaus, J.: *Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme. Dissertation*, Technische Universität, München, 2015
- [BACK15b] Backhaus, J.; Reinhart, G.: *Digital description of products, processes and resources for task-oriented programming of assembly systems*, In: Journal of Intelligent Manufacturing (Bd. 28), H. 8, S. 1787–1800
- [BACK17] Backhaus, J.; Hammerstingl, V.; Michniewicz, J. et al.: *Montage 4.0*, In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik, München, Hanser, 2017
- [BAUE15] Bauer, F.: *Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung. Dissertation*, Universität, Paderborn, 2015
- [BAUE18] Bauer, M.: *Das Recht des technischen Produkts: Praxishandbuch für Unternehmensjuristen*, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2018

- [BAUM16] Baumgart, I.: *Requirements Engineering*, In: Lindemann, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*, München, Hanser, 2016
- [BAYH16] Bayha, A.; Lúcio, L.; Aravantinos, V. et al.: *Factory Product Lines*, In: Schaefer, I. (Hrsg.): *Proceedings of the Tenth International Workshop on Variability Modelling of Software-intensive Systems*, New York, NY, ACM, 2016 (ACM Digital Library), S. 57–64
- [BECK10] Beckers, R.; Fröhlich, A.; Stjepandic, J.: *Anwendung und Potenziale universeller Visualisierungsformate*, In: 9. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Paderborn, 2010 (HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 274), S. 331–343
- [BERC97] Berchtold, S.; Keim, D.; Kriegel, H.-P.: *Section Coding: Ein Verfahren zur Ähnlichkeitssuche in CAD Datenbanken*, In: Dittrich, K.; Geppert, A. (Hrsg.): *Datenbanksysteme in Büro, Technik und Wissenschaft*, Berlin, Heidelberg, Springer, 1997 (Informatik aktuell).
- [BERG08] Bergert, M.; Diedrich, C.: *Durchgängige Verhaltensmodellierung von Betriebsmitteln zur Erzeugung digitaler Simulationsmodelle von Fertigungssystemen*, In: *atp - automatisierungstechnische Praxis* (Bd. 50), H. 7, S. 61–66
- [BLEE10] Blees, C.; Kipp, T.; Beckmann, G. et al.: *Development of Modular Product Families: Integration of Design for Variety and Modularization*, In: Dagman, A.; Söderberg, R. (Hrsg.): *DS 61: Proceedings of NordDesign 2010: the 8th International NordDesign Conference*, Göteborg, 2010
- [BOOS06] Boos, W. von; Zancul, E.: *PPS-Systeme als Bestandteil des Product Lifecycle Management*, In: Schuh, G. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2006 (VDI-Buch), S. 781–808
- [BOOS18] Boos, W.; Arntz, K.; Prümmer, M. et al.: *Erfolgreich CAx-Prozessketten Gestalten: im Werkzeugbau*, 1. Aufl., Aachen, WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, 2018
- [BOOT05] Boothroyd, G.: *Assembly Automation and Product Design*, Bd. 66, In: Boothroyd, G. (Hrsg.): *Manufacturing Engineering and Materials Processing*, Boca Raton, FL, Taylor & Francis, 2005
- [BOSS07] Bossmann, M.: *Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung. Dissertation*, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2007
- [BÖTT17] Böttger, U.: *Simulieren geht über probieren: Spektakuläre Tools bringen Roboter in Einklang* (2017), H. 15, S. 10–14

- [BRAC18] Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele*, 2. Aufl., Berlin, Springer Vieweg, 2018
- [BRAN14] Brandis, R.: *Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme. Dissertation*, Universität, Paderborn, 2014
- [BRÜG10] Brüggemann, D.: *Ein parametrisierbares Verfahren zur Änderungsplanung für den Flexible Flow Shop mit integrierter Schichtmodellauswahl. Dissertation*, Universität, Paderborn, 2010
- [BRUN12] Brunner, N.; Fallböhrer, M.; Sousanabady, R. et al.: *Plattformkonzept für die Montageplanung*, In: ZWF - Zeitschrift für den wissenschaftlichen Fabrikbetrieb (Bd. 107), H. 11, S. 825–830
- [BRUN16] Brunner, N.: *Entwicklung eines Plattformkonzeptes für die Planung von Montagesystemen. Dissertation*, Technische Universität, Dortmund, 2016
- [BULL86] Bullinger, H.-J. (Hrsg.); Ammer, D. (Mitarb.): *Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis*, München, Wien, Hanser, 1986
- [CHAN12] Chang, G. A.; Peterson, W. R.: *Using Design for Assembly Methodology to Improve Product Development and Design Learning at MSU*, In: ASEE Annual Conference & Exposition, 2012
- [CIUP14] Ciupek, M., VDI - Verein Deutscher Ingenieure: *Diesel- und Benzinmotoren laufen auf einer Linie*, Internet, 20.06.2014, (<https://www.vdi-nachrichten.com/technik/diesel-und-benzinmotoren-laufen-auf-einer-linie/>)
- [CONR13] Conrad, K.-J.: *Grundlagen der Konstruktionslehre: Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik©*, 6. Aufl., München, Hanser, 2013
- [CORS16] Corsten, H.; Gössinger, R.: *Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*, 14. Aufl., Berlin, De Gruyter Oldenbourg, 2016
- [DAHL90] Dahl, B.: *Entwicklung eines Konstruktionssystems zur Unterstützung der montagegerechten Produktgestaltung. Dissertation*, RWTH, Aachen, 1990
- [DANG03] Dangelmaier, W.: *Produktion und Information: System und Modell*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2003
- [DEUS98] Deuse, J.: *Fertigungsfamilienbildung mit feature-basierten Produktmodelldaten. Dissertation*, RWTH, Aachen, 1998
- [DIN03] Norm DIN 8593-0: *Fertigungsverfahren Fügen: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, 2003
- [DIN74] Norm DIN 8580: *Fertigungsverfahren: Einteilung*, 1974

- [DOBK19] Dobkin, D.; Funkhouser, T.; Finkelstein, A. et al., Princeton University: *Princeton Shape Retrieval and Analysis Group*, Internet, 14.04.2019, (<https://gfx.cs.princeton.edu/proj/shape/>)
- [ECL@21] eCI@ss e.V.: *eCI@ss content: classification and product description. ECLASS BASIC 12.0*, Internet, 25.11.2021, (<https://eclass.eu/eclass-standard/content-suche>)
- [EHRL14] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U. et al.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*, 7. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer, 2014
- [EHRL17] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*, 6. Aufl., München, Hanser, 2017
- [EIGN09] Eigner, M.; Stelzer, R.: *Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer, 2009
- [EILE14] Eilers, J.: *Methodik zur Planung skalierbarer und rekonfigurierbarer Montagesysteme. Dissertation*, RWTH, Aachen, 2014
- [EVER89] Eversheim, W.: *Organisation in der Produktionstechnik*, 2. Aufl., Düsseldorf, VDI-Verlag, 1989
- [EVER98] Eversheim, W.; Klocke, F.: *Werkzeugbau mit Zukunft: Strategie und Technologie*, Berlin, Heidelberg, Springer, 1998
- [FELD13] Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, 8. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer, 2013
- [FELD92] Feldmann, K. (Hrsg.): *Montageplanung in CIM*, Berlin, Heidelberg, Springer, 1992
- [FELD97] Feldmann, C.: *Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung. Dissertation*, Technische Universität, München, 1997
- [FRAN03] Franke, C.: *Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik. Dissertation*, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2003
- [GAUS14] Gausemeier, J.; Plass, C.: *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*, 2. Aufl., München, Hanser, 2014
- [GERD18] Gerdes, R.; Poitsch, M.: *Prozessgerechte Produktgestaltung und IT-unterstützte Baubarkeitsprüfung in der Motormontageplanung*, In: Müller, R. (Hrsg.): *Montagetechnik und Montageorganisation*, Saarbrücken,

- ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik, 2018 (Bd. 10).
- [GOLL11] Goll, J.: *Methoden und Architekturen der Softwaretechnik*, Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2011
- [GRAN14] Grande, M.: *100 Minuten für Anforderungsmanagement: Kompaktes Wissen nicht nur für Projektleiter und Entwickler*, 2. Aufl., Wiesbaden, Springer Vieweg, 2014
- [GRÄS15] Gräser, O.; Hundt, L.; John, M. et al., Common Working Group of AutomationML e.V.; eCI@ss e.V.: *AutomationML and eCI@ss integration*, Internet, 17.11.2015, (https://www.automationml.org/o.red/uploads/dateien/1448438009-20151030_WP_AutomationML_and_eClass_integration_v1.0_neu.pdf)
- [GRUN13] Grundig, C.-G.: *Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*, 4. Aufl., München, Hanser, 2013
- [HALF14] Halfmann, N.; Krause, D.; van Houten, F.: *Montagegerechtes Produktstrukturieren im Kontext einer Lebensphasenmodularisierung. Dissertation*, Technische Universität, Hamburg-Harburg, 2014
- [HAMM15] Hammerstingl, V.; Moule, L.; Reinhart, G.: *Bildverarbeitungssysteme als cyber-physische Sensoren: Wenn das Produkt seine Wünsche kommuniziert ...*, In: atp - automatisierungstechnische Praxis (Bd. 57), H. 11, S. 44–57
- [HAMM17] Hammerstingl, V.; Reinhart, G.: *Fähigkeiten in der Montage: Forschungsprojekt Akomi. Forschungsbericht*, Technische Universität, München, 2017
- [HEES17] Hees, A.: *System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. Dissertation*, Technische Universität, München, 2017
- [HERT10] Hertel, L.; Klaiber, E.; Wallner, U.: *Technische Regeln systematisch managen: Ein Leitfaden für den Aufbau und Betrieb einer rechnergestützten innerbetrieblichen Dokumentenverwaltung*, 2. Aufl., Berlin, Beuth, 2010
- [HESS06] Hesse, S.: *Montagegerechte Produktgestaltung*, In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2006, S. 11–57
- [HESS12] Hesse, S.; Krahn, H.; Eh, D.: *Betriebsmittel Vorrichtung: Grundlagen und kommentierte Beispiele*, 2. Aufl., München, Hanser, 2012
- [HESS94] Hesse, S.: *Montage-Atlas: Montage- und automatisierungsgerecht konstruieren*, Darmstadt, Hoppenstedt Technik-Tabellen-Verlag, 1994

- [HOLT00] Holthöfer, N.: *Regeln in einer Mengenplanung unter Ausbringungsgrenzen. Dissertation*, Universität, Paderborn, 2000
- [HORS18] Volk, F.; Fuchslocher, G.: *BMW-Managerin Horstmeier: "Solitäre Fertigung ist Auslaufmodell". Exklusiv-Interview*. Interview mit Ilka Horstmeier. 18.07.2018
- [ISO15] Norm ISO 16792: *Technical product documentation: Digital product definition data practices*, 2015
- [JONA00] Jonas, C.: *Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. Dissertation*, Technische Universität, München, 2000
- [JUHL15] Juhl, D.; Küstenmacher, W. (Mitarb.): *Technische Dokumentation: Praktische Anleitungen und Beispiele*, 3. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2015
- [KARL14] Karl, F.: *Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln. Dissertation*, Technische Universität, München, 2014
- [KICK95] Kickermann, H.: *Rechnerunterstützte Verarbeitung von Anforderungen im methodischen Konstruktionsprozess. Dissertation*, Technische Universität, Braunschweig, 1995
- [KIEF06] Kiefer, J.; Bergholz, W.: *Virtuelle Inbetriebnahme - Hürden und Wege in die operative Praxis*, In: Zäh, M. (Hrsg.): *Virtuelle Inbetriebnahme: Von der Kür zur Pflicht?*, München, Utz, 2006 (Seminarberichte / Iwb, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Bd. 84), S. 2-1 - 2-20
- [KIPP10] Kipp, T.; Blees, C.; Krause, D.: *Anwendung einer integrierten Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien*, In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): *DFX 2010: Proceedings of the 21st Symposium on Design for X*, 2010
- [KIST02] Kistner, K.-P.; Steven, M.: *Produktion, Absatz, Finanzierung*, 4. Aufl., Berlin, Springer, 2002
- [KITS14] Kitsios, V.; Haslauer, R.: *3D-Master: Zeichnungslose Produktbeschreibung mit CATIA V5*, Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2014
- [KLUG11] Kluge, S.: *Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Dissertation*, Universität, Stuttgart, 2011
- [KNES12] Kneschke, C.; Schmauder, M.: *Grundlagen zur methodischen Beurteilung der montagegerechten Produktgestaltung anhand virtueller Werkzeuge*, In: Stelzer, R.; Grote, K.-H.; Brökel, K. et al. (Hrsg.): *Entwerfen – Entwickeln – Erleben: Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung*, Dresden, Verlag der Wissenschaften, 2012

- [KONO03] Konold, P.; Reger, H.: *Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung*, 2. Aufl., Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2003
- [KORN10] Kornwachs, K.: *Logische Strukturen technischen Wissens: Zur Wissenschaftstheorie der Technikwissenschaften*, In: Kornwachs, K. (Hrsg.): *Technologisches Wissen: Entstehung, Methoden, Strukturen*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2010 (Acatech diskutiert), S. 137–157
- [KOTL07] Kotler, P.; Keller, K.; Bliemel, F.: *Marketing-Management: Strategien für wertschaffendes Handeln*, 12. Aufl., München, Pearson Studium, 2007
- [KÖVA11] Kövari, L.: *Konzeption und Realisierung eines neuen Systems zur produktbegleitenden virtuellen Inbetriebnahme komplexer Förderanlagen. Dissertation*, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2011
- [KRAU15] Kraus, J.-H.: *Ein Geben und Nehmen: Das Zusammenspiel von Produkt- und Prozessbaukästen*, In: *Complexity Management Journal* (2015), H. 3, S. 8–11
- [KROP09] Kropik, M.: *Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2009
- [LEIS17] Leistner, B.; Mayer, R.; Berkan, D.: *Process design for a companywide geometrical integration of manufacturing issues in the early development phases based on the example of automotive suspension*, In: Pfeffer, P. (Hrsg.): *8th International Munich Chassis Symposium 2017: Chassis.tech plus*, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017 (Proceedings), S. 353–370
- [LEIS19] Leistner, B.; Mayer, R.; Berkan, D.: *Produktentwicklungsprozess für das Fahrwerk*, In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (Bd. 121), H. 1, S. 74–79
- [LEXI13] Lexikon-Redaktion des Gabler Verlages; Piekenbrock, D. (Mitarb.): *Gabler Kompakt-Lexikon Wirtschaft: 4.500 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden*, 11. Aufl., Wiesbaden, Springer Gabler, 2013
- [LIND09] Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*, 3. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer, 2009
- [LOFE02] Loferer, M.: *Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen*, München, Utz, 2002
- [LOTT06] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2006
- [LOTT12] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer, 2012

- [LOTT92] Lotter, B.: *Wirtschaftliche Montage: Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik*, 2. Aufl., Düsseldorf, VDI-Verlag, 1992
- [LUST89] Lusti, M.: *Dateien und Datenbanken: Eine anwendungsorientierte Einführung*, Berlin, Heidelberg, Springer, 1989
- [MARC05] Marczinski, G.: *Digitale Fabrik – mit dem 4-Stufenmodell zum Erfolg*, In: PPS Management (Bd. 10), H. 2, S. 38–41
- [MATY09] Matyszcok, C.; Meyer, D.: *Erfolgsfaktoren bei der strategischen Einführung der Digitalen Fabrik*, In: ZWF - Zeitschrift für den wissenschaftlichen Fabrikbetrieb (Bd. 104), H. 1-2, S. 27–31
- [MAYE07] Mayer-Bachmann, R.: *Integratives Anforderungsmanagement: Konzept und Anforderungsmodell am Beispiel der Fahrzeugentwicklung. Dissertation*, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2007
- [MEET08] Meeth, J.; Schuth, M.: *Bewegungssimulation mit CATIA V5: Grundlagen und praktische Anwendung der kinematischen Simulation*, 2. Aufl., München, Hanser, 2008
- [MEIß10] Meißner, R.: *Digitale Absicherung der Montagetauglichkeit: Ein Beitrag zur Integration von Produktentwicklung und Montageplanung. Dissertation*, Universität, Magdeburg, 2010
- [MENG01] Menge, M.: *Ein Beitrag zur Beherrschung der Variantenvielfalt in der auftragsbezogenen Einzel- und Kleinserienfertigung komplexer Produkte. Dissertation*, Technische Universität, Essen, 2001
- [MICH17] Michniewicz, J.; Leiber, D.; Riedl, F. et al.: *Automatisierte digitale Anlagenplanung: Methode für die automatisierte Planung von Montageanlagen auf Basis digitaler Produktdaten*, In: wt Werkstatttechnik online (Bd. 107), H. 9, S. 582–589
- [MOHA13] Mohapatra, P.; Benyoucef, L.; Tiwari, M.: *Integration of process planning and scheduling through adaptive setup planning: a multi-objective approach*, In: International Journal of Production Research (Bd. 51), H. 23-24, S. 7190–7208
- [MOOS04] Moos, A.: *Datenbank-Engineering: Analyse, Entwurf und Implementierung objektrelationaler Datenbanken - mit UML, DB2-SQL und Java*, 3. Aufl., Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2004
- [MOTZ15] Motzer, D.: *Strukturalternative für die Aggregateaufrüstung einer automobilen Fertigung: Konzeption und Evaluation eines Montagesystems*, Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2015
- [MÜLL11] Müller, R.; Eilers, J.; Esser, M. et al.: *Wandlungsfähigkeit in der Montage: Chance für eine schwer planbare Zukunft*, In: Brecher, C.; Klocke,

- F.; Schmitt, R. et al. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik, Aachen, Shaker, 2011 (Aachener Perspektiven), S. 423–447
- [MÜLL13a] Müller, R.: *Gestaltungsrichtlinien - Montagegerecht*, In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 8. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer, 2013
- [MÜLL13b] Müller, R.; Esser, M.; Eilers, J.: *Assembly Oriented Design Method for Reconfigurable Processes and Equipment*, In: Schuh, G.; Neugebauer, R.; Uhlmann, E. (Hrsg.): Future Trends in Production Engineering, Berlin, Heidelberg, Springer, 2013, S. 251–257
- [MÜLL15] Müller, R.; Eilers, J.; Hörauf, L. et al.: *Modell zur fähigkeitsbasierten Montageplanung*, In: ZWF - Zeitschrift für den wissenschaftlichen Fabrikbetrieb (Bd. 110), H. 9, S. 553–557
- [MÜLL17] Müller, R.; Eilers, J.; Hermanns, L. et al.: *Modellunterstützte Baubarkeitsprüfung in der Montageplanung: Planungsgenauigkeit bei der Integration von Bauteilvarianten erhöhen*, In: wt Werkstatttechnik online (Bd. 107), H. 4, S. 253–260
- [MÜLL18a] Müller, R.: *Gestaltung und Chancen smarter Produktionssysteme: Industrie 4.0 auf dem betrieblichen Hallenboden*, In: Müller, R. (Hrsg.): Montagetechnik und Montageorganisation, Saarbrücken, ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik, 2018 (Bd. 10), S. 9–37
- [MÜLL18b] Müller, R.; Mailahn, O.; Peifer, R.: *TOOL: Eine Sprachdomäne für die Montageplanung: Softwareunterstützte Planung von Mensch-Roboter-Kooperation mit Hilfe von Ontologien*, In: wt Werkstatttechnik online (Bd. 108), H. 9, S. 606–610
- [MÜLL19] Müller, R.; Peifer, R.; Mailahn, O.: *Objectification of Assembly Planning for the Implementation of Human-Robot Cooperation*, In: Ahram, T. (Hrsg.): Advances in Artificial Intelligence, Software and Systems Engineering, Cham, Springer International Publishing, 2019 (Advances in Intelligent Systems and Computing, Bd. 787), S. 24–34
- [NYHU08] Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E. (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten*, Garbsen, PZH-Verlag, 2008
- [NYHU13] Nyhuis, P.; Deuse, J.; Rehwald, J. (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktion: Heute für morgen gestalten ; WaProTek - Wandlungsförderliche Prozessarchitekturen*, Garbsen, PZH-Verlag, 2013

- [OBER19] Obermaier, R.: *Industrie 4.0 und Digitale Transformation als unternehmerische Gestaltungsaufgabe*, In: Obermaier, R. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation*, Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2019 (Bd. 49), S. 3–46
- [PATR04] Patron, C.: *Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung. Dissertation*, Technische Universität, München, 2004
- [POHL08] Pohl, K.: *Requirements Engineering: Grundlagen, Prinzipien, Techniken*, 2. Aufl., Heidelberg, dpunkt-Verlag, 2008
- [PONN11] Ponn, J.; Lindemann, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer, 2011
- [PRAS96] Prasad, B.: *Concurrent engineering fundamentals*, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR, 1996
- [PROS12] proSTEP iVIP (Hrsg.): *Modern Production Planning Processes*, Darmstadt, 2012
- [RAPP99] Rapp, T.: *Produktstrukturierung: Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen*, Wiesbaden, Springer Fachmedien, 1999
- [REFA90] REFA: *Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme*, 2. Aufl., München, Hanser, 1990
- [REIN07] Reinhart, G.; Hensel, T.; Lindworsky, A. et al.: *Teilautomatisierter Aufbau von Simulationsmodellen*, In: *wt Werkstatttechnik online* (Bd. 97), H. 9, S. 663–667
- [RUPP01] Rupprecht, C.; Rose, T.; Fünffinger, M. et al.: *Management von Prozesswissen in Fahrzeugentwicklungsprojekten*, In: *Proceedings of the WM2001 Conference*, Baden Baden, 2001
- [RUPP09] Rupp, C.: *Requirements-Engineering und -Management: Professionelle, iterative Anforderungsanalyse für die Praxis*, 5. Aufl., München, Wien, Hanser, 2009
- [SCHN11] Schneider, U.: *Hauptfachpraktikum Automatisieren: Modul 1: Montagegerechte Produktgestaltung*, Universität, Stuttgart, 2011
- [SCHN99] Schnieder, E.: *Methoden der Automatisierung: Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme*, Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 1999
- [SCHO91] Scholz-Reiter, B.: *CIM-Schnittstellen: Konzepte, Standards und Probleme der Verknüpfung von Systemkomponenten in der rechnerintegrierten Produktion*, 2. Aufl., München, Oldenbourg, 1991

- [SCHU00] Schumann, H.; Müller, W.: *Visualisierung: Grundlagen und Allgemeine Methoden*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2000
- [SCHU05] Schuh, G.: *Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools*, 2. Aufl., München, Wien, Hanser, 2005
- [SCHU12] Schuh, G.; Arnoscht, J.; Schiffer, M.: *Innovationscontrolling*, In: Schuh, G. (Hrsg.): *Innovationsmanagement*, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2012, S. 249–350
- [SCHU12] Schuh, G.; Bender, D.: *Grundlagen des Innovationsmanagements*, In: Schuh, G. (Hrsg.): *Innovationsmanagement*, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2012, S. 1–16
- [SELI14] Seliger, G.: *Montage und Demontage*, In: Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, 24. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2014, S. 119–123
- [SIED17] Siedelhofer, C.; Henke, T.; Bellmann, A. et al.: *Konzept zur Rekonfiguration flexibler Montagesysteme: Rahmenmodell mit modularem Rekonfigurationsprozess und Planungsdatenbank*, In: *ZWF - Zeitschrift für den wissenschaftlichen Fabrikbetrieb* (Bd. 112), H. 3, S. 141–145
- [SIEM17] Siemens AG: *Assembly planning with Teamcenter MPP. 2017* (Dokumentation Siemens Teamcenter)
- [SIND14] Sindermann, S.: *Schnittstellen und Datenaustauschformate*, In: Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. (Hrsg.): *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*, Berlin, Springer Vieweg, 2014, S. 327–347
- [SOMA15] Somani, N.; Perzylo, A.; Cai, C. et al.: *Object detection using boundary representations of primitive shapes*, In: *IEEE Industrial Electronics Society* (Hrsg.): *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Zhuhai, 2015, S. 108–113
- [SPUR13] Spur, G.; Feldmann, K.; Schöppner, V.: *Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren*, München, Hanser, 2013
- [SPUR86] Spur, G.: *Fügen, Handhaben und Montieren*, München, Hanser, 1986
- [STAC73] Stachowiak, H.: *Allgemeine Modelltheorie*, Wien, Springer, 1973
- [STAP13] Stapelkamp, T.: *Informationsvisualisierung: Web - Print - Signaletik ; erfolgreiches Informationsdesign: Leitsysteme, Wissensvermittlung und Informationsarchitektur*, Heidelberg, Springer Vieweg, 2013
- [STAR10] Stark, R.; Kind, C.: *Prozessmanagement in der Produktentstehung*, In: Jochem, R.; Mertins, K.; Knothe, T. (Hrsg.): *Prozessmanagement: Strategien, Methoden, Umsetzung*, 1. Aufl., Düsseldorf, Symposium Publishing, 2010, S. 377–411

- [STEG10] Stegemann, P.: *Integrierte Komplexitätsbeherrschung in der Produktentwicklung durch Produktkommunalitäten. Dissertation*, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2010
- [STEI15] Steinparzer, F.; Brüner, T.; Schwarz, C. et al.: *Die neuen Drei- und Vierzylinder-Ottomotoren von BMW*, In: Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme und Effiziente Antriebe*, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2015 (ATZ- / MTZ-Fachbuch), S. 116–127
- [STEI96] Steinwasser, P.: *Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozessplanung. Dissertation*, Universität, Erlangen, Nürnberg, 1996
- [STEK07] Stekolschik, A.: *Ein Beitrag zum ganzheitlichen Qualitätsmanagement von CAD-Modellen in der Produktentstehung. Dissertation*, Ruhr-Universität, Bochum, 2007
- [STÖC10] Stöcker, P.: *Eine Methode zur rechnergestützten Ähnlichkeitssuche für Baukastenprodukte. Dissertation*, Technische Universität, Darmstadt, 2010
- [SYAN94] Syan, C.; Swift, K.: *Design for manufacture*, In: Syan, C.; Menon, U. (Hrsg.): *Concurrent Engineering: Concepts, implementation and practice*, Dordrecht, Springer Netherlands, 1994, S. 101–115
- [TALL18] Tallón-Ballesteros, A.; Tuba, M.; Xue, B. et al.: *Feature Selection and Interpretable Feature Transformation: A Preliminary Study on Feature Engineering for Classification Algorithms*, In: Yin, H.; Camacho, D.; Novais, P. et al. (Hrsg.): *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL: Proceedings*, Cham, Springer International Publishing, 2018 (Information Systems and Applications, Bd. 2), S. 280–287
- [TÜCK11] Tücks, G.; Eilers, J.: *Komplexitätsbeherrschung durch wandlungsfähige Produktion: Es gilt den Fit zwischen Komplexität und Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems einzustellen*, In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R. et al. (Hrsg.): *Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik*, Aachen, Shaker, 2011 (Aachener Perspektiven), S. 4–8
- [TÜCK15] Tücks, G.; Stoffel, M.: *Die Kraft von Produktionsarchitekturen*, In: *Complexity Management Journal* (2015), H. 3, S. 4–7
- [ULRI76] Ulrich, P.; Hill, W.: *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*, In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium* (1976), H. 7, S. 304–309
- [ULRI84] Ulrich, H.: *Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft*, In: Dyllick, T.; Probst, G. (Hrsg.): *Management*, Bern, Stuttgart, Haupt, 1984 (Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmungsführung, Bd. 13), S. 168–199

- [UNGE85] Ungeheuer, U.: *Produkt- und Montagestrukturierung: Methodik zur Planung einer anforderungsgerechten Produkt- und Montagestruktur für komplexe Erzeugnisse der Einzel- und Kleinserienproduktion. Dissertation*, RWTH, Aachen, 1985
- [VDI16] Norm VDI 2219: *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung: Einführung und Betrieb von PDM-Systemen*, 2016
- [VDI18] Norm VDI 3633: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Begriffe*, 2018
- [VDI78] Norm VDI 2815: *Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung*, 1978
- [VDI87] Norm VDI 2235: *Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren: Methoden und Hilfen*, 1987
- [VDI90] Norm VDI 2860: *Montage- und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*, 1990
- [WACK10] Wack, K.-J.; Bär, T.; Straßburger, S.: *Grenzen einer digitalen Absicherung des Produktionsanlaufs*, In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*, Karlsruhe, KIT Scientific Publ, 2010, S. 45–52
- [WAGN12] Wagner, K.-P.: *Einführung Wirtschaftsinformatik: IT-Grundwissen für Studium und Praxis*, Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2012
- [WANG09] Wang, L.; Nee, A.: *Collaborative Design and Planning for Digital Manufacturing*, London, Springer, 2009
- [WEIN05] Weiner, V.: *Nutzen der "Digitalen Fabrik"*, Hamburg, Diplomica, 2005
- [WENT15] Wentura, D.; Pospeschill, M.: *Multivariate Datenanalyse: Eine kompakte Einführung*, Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2015
- [WEST06] Westkämper, E.; Decker, M.: *Einführung in die Organisation der Produktion*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2006
- [WIEN10] Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure. Mit 2 Tabellen*, 7. Aufl., München, Hanser, 2010
- [WIEN14] Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*, 2. Aufl., München, Hanser, 2014
- [YAO18] Yao, Y.; Su, X.; Tong, H. (Hrsg.): *Mobile Data Mining*, Cham, Springer International Publishing, 2018