

Alexander Neb

»Methodik zur automatischen Generierung
von Montagesequenzen aus einem 3D-Modell«



Alexander Neb

»Methodik zur automatischen Generierung von Montagesequenzen aus
einem 3D-Modell«

Herausgeber

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

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke⁴

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

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

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

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

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

Kontaktadresse:

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

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2023

D 93

2023

Druck und Weiterverarbeitung:

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



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

Methodik zur automatischen Generierung von Montagesequenzen aus einem 3D-Modell

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

Vorgelegt von

Alexander Neb
aus Karaganda, Kasachstan

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

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ruskowski

Tag der mündlichen Prüfung: 13.06.2023

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF
der Universität Stuttgart

2023

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit ist das Resultat eines Lebenstraums und dem Mut, eine Anstellung am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) anzunehmen. In meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter hatte ich die Möglichkeit, mich beruflich zu entfalten, zeitlose Freundschaften zu knüpfen und neue Ziele zu entdecken, für die es sich lohnt, Überstunden zu machen. Ich danke hierbei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bauernhansl im besonderen Maße für die Unterstützung auf meinen Wegen, das offene Ohr und die Ratschläge.

Zudem gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Ruskowski, für die persönlichen Gespräche und anregenden Diskussionen. Durch die Übernahme des Mitberichts konnte ich so einen zweiten Mentor gewinnen.

Herzlich möchte ich mich auch bei meinen Kollegen bedanken. Allen voran meinem Teamleiter Ramez Awad, der mich immer bewegte, mehr zu erreichen und nie die Geduld mit mir verloren hat. Dr.-Ing. Manuel Fechter für seinen Rat, auch zu spätestester Stunde und meinem Abteilungsleiter Dr.-Ing. Werner Krauss für seine Unterstützung. Dank gilt darüber hinaus auch all meinen Kollegen von 327, gemeinsam haben wir Großartiges bewegen können!

Einen Dank möchte ich auch meinen Mitstreitern von ARCaide aussprechen. Danke Jens Popper, Florian Strieg und Greg Rauhöft für den neuen Lebensabschnitt - Gemeinsam machen wir aus einer Vision eine Revolution!

Von ganzem Herzen möchte ich auch meiner Familie danken. Größten Dank gebührt meiner Frau Sophia, die mich in stressigsten Situationen, düstersten Stunden und müden

Nächten immer wieder motivierte. Erst durch ihre liebende Ausdauer, gute Laune und diktatorische Disziplin war es mir möglich, diese Arbeit zu vollenden.

Einen Letzen Dank möchte ich auch noch an meine Eltern Inna und Michael Neb, sowie Großeltern Erna und Alexander Neb aussprechen. Danke für euren Rückhalt und eure Förderung.

Euch allen widme ich diese Arbeit.

Weinstadt, 27.07.2022

Alexander Neb

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	viii
Abbildungsverzeichnis	x
Tabellenverzeichnis	xvi
Kurzfassung.....	xvii
Abstract	xviii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Problemstellung	4
1.3 Zielsetzung	10
1.4 Aufbau der Arbeit	16
2 Stand der Technik	18
2.1 Generierung von Montagesequenzen	19
2.2 Ableitung der Montagesequenzen.....	45
2.3 Montageplanung mit Schnittstellen zu 3D-Modellen.....	52
2.4 Kommerziell verfügbare Lösungen.....	67
3 Konzept	70
3.1 Extraktion von Montageinformationen aus einem 3D-Modell	70
3.2 Generierung von Montagesequenzen	81
3.3 Fazit zum Konzept	84
4 Generierung von Montagesequenzen aus einem 3D-Modell.....	86
4.1 Modell zur Beschreibung von Montageinformationen	86

4.2	Featurebasierte Modellanalyse	97
4.3	Featurebasierte Kollisionsanalyse	103
4.4	Bestimmung der Montagesequenz	110
4.5	Visualisierung der Montagesequenz	121
5	Validierung der Montagesequenzen	123
5.1	Quantitative Bewertung der Ergebnisse	124
5.2	Experteninterviews mit Dienstleistern für technische Dokumentationen.....	128
5.3	Abgleich mit Montagedokumentationen für Konsumgüter.....	136
5.4	Kritische Würdigung der Ergebnisse	141
6	Zusammenfassung und Ausblick	143
6.1	Zusammenfassung	143
6.2	Ausblick und weiterführende Anknüpfungspunkte	145
7	Summary.....	xx
8	Literaturverzeichnis	xxii
9	Anhang.....	lxxiii
9.1	Ergänzende Ansätze zur Bestimmung von Montagesequenzen.....	lxxiii
9.2	Bestimmung von Features in einer STEP AP203	lxxx
9.3	Implementierung	lxxxii
9.4	Automatisch generierte Montageanleitung des MCAB.....	lxxxviii
9.5	Bilder des Demonstrators im Future Work Lab.....	xcvii
9.6	Geschwärzter APA-Bogen.....	xcix

Abkürzungsverzeichnis

ACA	Ant Colony Algorithm
AP	Application Protocol
APA	Automatisierungspotenzial-Analyse
API	Application Programmable Interface
AR	Augmented Reality
ASPW-DRL	Assembly Sequence Planning System for Workpieces Deep Reinforcement Learning
BoM	Bill-of-Materials
BPSO	Binary Particle Swarm Optimization
CAB	Cranfield Assembly Benchmark
CAD	Computer-aided Design
CAM	Computer-aided Manufacturing
CAP	Computer-aided Planning
CAPP	Computer-aided Process Planning
DPSO	Discrete Particle Swarm Optimization
DRL	Deep Reinforcement Learning
ESG	Einstufiges Stirnradgetriebe
GUI	Graphical User Interface
ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
KA	Kollisionsanalyse
KI	Künstliche Intelligenz
MCAB	Modified Cranfield Assembly Benchmark

mc-RRT	Minimum-cost Rapidly-growing Random Tree
OCCT	Open CASCADE Technology
OMG	Object Management Group
PDM	Produktdatenmanagementsystem
PEP	Produktentwicklungsphase
PLM	Product Lifecycle Management
PMI	Product Manufacturing Information
PSO	Particle Swarm Optimization
RL	Reinforcement Learning
RRT	Rapidly-growing Random Tree
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
TSP	Traveling Salesperson Problem
UML	Unified Modeling Language
VBA	Visual Basic for Applications
VR	Virtual Reality

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Dilemma der Konstruktion nach Ehrlenspiel et al. (2003; 2014), eigene Darstellung in Anlehnung an Das Wirtschaftslexikon (2015).....	3
Abbildung 1.2	Einteilung der Montagetätigkeiten nach ihrem Wertschöpfungsgrad in Anlehnung an Lotter et al. (2012), Feldmann et al. (2014) und Galaske (2019).....	6
Abbildung 1.3	Heutiges Vorgehen zur Erhebung von Montageinformationen und Erstellung von Montageanleitungen (eigene Darstellung).....	8
Abbildung 1.4	Herausforderungen der Arbeit.....	11
Abbildung 1.5	Einordnung der Arbeit nach der Wissenschaftssystematik von Ulrich et al. (1976) in eigener Darstellung.....	15
Abbildung 1.6	Aufbau der Arbeit.....	17
Abbildung 2.1	Aufbau des Kapitels „Stand der Technik“	18
Abbildung 2.2	Ordnung von Montagesequenzen, eigene Darstellung in Anlehnung an Bahubalendruni et al. (2016a).....	19
Abbildung 2.3	Baugruppe mit drei Bauteilen und drei Kontakt-Liaisons.....	21
Abbildung 2.4	„Bolt-nut plate fixing“ und Liaison-Graph, eigene Darstellung in Anlehnung an Viganò et al. (2012).....	25
Abbildung 2.5	Methode zur Ableitung geometrisch ausführbarer Montagesequenzen (Dini et al. 1992) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	26
Abbildung 2.6	Beispiel einer geeigneten Montageachse (Ben Hadj et al. 2015) – von CC-Lizenz ausgenommen	28

Abbildung 2.7	Schnittansicht einer Überschneidung der Gewindeflächen einer Schraube und Mutter im CAD-Modell.....	30
Abbildung 2.8	Verbau und Einbauposition eines axialen Sicherungsrings.....	30
Abbildung 2.9	Klassifikation von Normteilen mithilfe von KI in Anlehnung an Briki (2019b) und Neb et al. (2020b).....	32
Abbildung 2.10	Benötigte zweigliedrige Bewegung zur Montage einer Schraube in eine C-Schiene, eigene Darstellung in Anlehnung an Neb et al. (2021e) und Göke (2019).....	33
Abbildung 2.11	Unterscheidung der Schwerkraftstabilität: translatorische Stabilität (rechts) und rotatorisch Stabilität (links) (Ou et al. 2013) – von CC-Lizenz ausgenommen	35
Abbildung 2.12	Vergleich von Montagerichtungswechsel bei einer Reorientierung.....	39
Abbildung 2.13	Ansätze zur Generierung optimierbarer Montagesequenzen..	44
Abbildung 2.14	AND/OR Graph einer dreiteiligen Baugruppe (Homem de Mello et al. 1990) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	46
Abbildung 2.15	Unterschiedliche Möglichkeiten für den Zugriff auf die Informationen in 3D-Modellen.....	53
Abbildung 2.16	Kollisionsanalyse eines 3D-Modells in eigener Darstellung mit Abbildungen von Thomas et al. (2003).....	56
Abbildung 2.17	Entwickelter Workflow von Kardos et al. (2020) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	57
Abbildung 2.18	Darstellung von Durchdringungsfaktoren aus einem Mesh-Modell (Andre et al. 2017) – von CC-Lizenz ausgenommen...	58
Abbildung 2.19	Low-level und High-level Features, eigene Darstellung in Anlehnung an Neb (2019).....	60

Abbildung 2.20	Feature-Struktur der SolidWorks Baugruppen (Mathew et al. 2010a) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	61
Abbildung 2.21	Framework der Feature-Extraction-Methode (Hasan et al. 2017b) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	63
Abbildung 3.1	Zu extrahierende Montageinformationen aus dem Anwendungsfall „bolt-nut plate fixing“	71
Abbildung 3.2	Darstellung eines kosmetischen Gewindes (unten) und eines geometrischen Gewindes (oben).....	73
Abbildung 3.3	Ergebnisse der Extraktion montagerelevanter Informationen aus STEP-Formaten der ISO 10303.....	75
Abbildung 3.4	Manuell hinterlegte CAD-Verknüpfungen in Anlehnung an Neb (2019).....	77
Abbildung 3.5	Ergebnisse der Extraktion montagerelevanter Informationen aus High-level Features in CAD-Systemen.....	77
Abbildung 3.6	Systematisierung der extrahierten Features bei einem kombinierten Ansatz.....	79
Abbildung 3.7	Übersicht unterschiedlicher Ansätze.....	80
Abbildung 3.8	Liaison-Graph der „bolt-nut plate fixing“ in eigener Darstellung in Anlehnung an Neb (2019).....	82
Abbildung 3.9	Montage von Wellen in einem Getriebe.....	84
Abbildung 3.10	Im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Normteile.....	85
Abbildung 4.1	Aufbau einer Methodik in Anlehnung an Heyn (1999) (Neuhausen 2001).....	86
Abbildung 4.2	Modellnotationsmatrix (Foith-Förster et al. 2019) – von CC-Lizenz ausgenommen	90
Abbildung 4.3	Verfolgter Ansatz zur automatischen Generierung von Montagesequenzen aus einem 3D-Modell.....	92

Abbildung 4.4	UML-Modell zur Beschreibung von Montageinformationen... 93
Abbildung 4.5	Objektmodell der SolidWorks API Interfaces (Hasan et al. 2016b) – von CC-Lizenz ausgenommen..... 98
Abbildung 4.6	Gefahren bei der automatischen Generierung von Bounding Boxes..... 99
Abbildung 4.7	Standardverknüpfungen in SolidWorks 2019..... 99
Abbildung 4.8	Symbolisches Vorgehen einer Koordinatentransformation (GeoGebra 2021) – von CC-Lizenz ausgenommen..... 100
Abbildung 4.9	Untersuchte Assembly Features..... 101
Abbildung 4.10	Prüffaktoren einer Senkschraube mit Innensechskant nach DIN EN ISO 10642..... 103
Abbildung 4.11	Ermittlung der (De)montagerichtung auf Basis von Assembly Features..... 105
Abbildung 4.12	Montage von Normteilen in einer Kollisionsanalyse..... 106
Abbildung 4.13	Visualisierung der Rotationsgeometrie eines Innensechskantschlüssels in einem Getriebe..... 107
Abbildung 4.14	Analyse mehrgliedriger Bewegungen..... 109
Abbildung 4.15	Einfluss der Schwerkraftrichtung auf die Montage..... 110
Abbildung 4.16	Generierte Informationen aus dem 3D-Modell..... 112
Abbildung 4.17	Resultierende Optimierungskriterien..... 113
Abbildung 4.18	Symbolische Darstellung des Cheapest Insertion Algorithm... 118
Abbildung 4.19	Montage einer Welleneinheit als Unterbaugruppe in die Hauptbaugruppe..... 119
Abbildung 4.20	Darstellung der automatisch generierten Montageanleitung.. 122
Abbildung 5.1	Dreistufige Validierung der Arbeit..... 123
Abbildung 5.2	Unterschied CAB und MCAB..... 125

Abbildung 5.3	Montage der Tischbeine des LACK.....	126
Abbildung 5.4	Montage der Dübel und Schrauben im Anwendungsfall KALLAX.....	127
Abbildung 5.5	Modifizierte Schaltleiste der ELABO GmbH (a) und Schuko- Steckdosen (b).....	128
Abbildung 5.6	MCAB: Aufbau (a), Montagesequenz (b) und Features (c).....	129
Abbildung 5.7	ESG: Aufbau (a), Montagesequenz (b) und Features (c).....	131
Abbildung 5.8	Vergleich von LACK und KALLAX mit dem 3D-Modell (IKEA 2021a, 2021b).....	136
Abbildung 5.9	LACK: Aufbau (a), Montagesequenz (b) und Features (c).....	137
Abbildung 5.10	Montageanleitung des LACK (IKEA 2021a) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	138
Abbildung 5.11	Vergleich der automatisch generierten Montagesequenz mit der originalen KALLAX-Anleitung von IKEA (2021b) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	139
Abbildung 6.1	Extrahierte Informationen aus einem 3D-Modell.....	144
Abbildung 9.1	Demontage-Petri-Netz eines schematischen Kugelschreibers (Guo et al. 2016) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	lxxiii
Abbildung 9.2	Das Verhalten von Ameisen bei Hindernissen als Basis für den Ant Colony Algorithm (Blum et al. 2004) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	lxxv
Abbildung 9.3	Aufbau eines ontologischen Ansatzes und Reasoning Framework (Qiao et al. 2018) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	lxxx
Abbildung 9.4	Struktur einer STEP AP203 in eigener Darstellung in Anlehnung an Oussama et al. (2014) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	lxxxi

Abbildung 9.5	Gesamtübersicht der beiden Arbeitsplätze (Bild: Fraunhofer IPA) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	xcvii
Abbildung 9.6	Arbeitsplatz 1 im Büro: Assistierte Planung der Montage (Bild: Fraunhofer IPA) – von CC-Lizenz ausgenommen.....	xcvii
Abbildung 9.7	Arbeitsplatz 2 in der Montage: Werker/-in bei der Montage mit der automatisch generierten AR-Montageassistenz (Bild: Fraunhofer IPA) – von CC-Lizenz ausgenommen	xcviii
Abbildung 9.8	APA-Bogen (geschwärzt) in Anlehnung an Neb (2020).....	xcix

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1	Kurzbeschreibung der Forschungsziele und veröffentlichte Vorarbeiten.....	13
Tabelle 2.1	Vergleich der untersuchten Lösungsansätze zur Ableitung von Montagesequenzen.....	51
Tabelle 2.2	Vergleich von Demontageansätzen und featurebasierten Ansätzen.....	66
Tabelle 2.3	Übersicht zu kommerziell verfügbaren Lösungen.....	69
Tabelle 4.1	Extrahierte Normteile und Merkmalsausprägungen.....	102
Tabelle 5.1	Untersuchte Anwendungsfälle.....	124

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, wie Montageplaner/-innen schon frühzeitig bei der Planung von Montagesequenzen unterstützt werden können. Hierzu wurde geprüft, wie montagerelevante Informationen aus einem 3D-Modell extrahiert werden können. Anschließend wurde ein Vorgehen entwickelt, um aus diesen Informationen automatisiert Montagesequenzen zu generieren. Hierzu wurden zwei Kernfragen geklärt: Welche Montageinformationen können automatisiert aus 3D-Modellen extrahiert werden und wie können aus diesen Informationen automatisiert Montagesequenzen generiert werden?

Mithilfe eines Zugriffs auf das CAD-System wurden alle relevanten Informationen direkt aus dem 3D-Modell extrahiert. Durch einen neuartigen Ansatz konnten vielfältige und detaillierte Montageinformationen in Form von Features gewonnen und analysiert werden. Diese wurden dazu eingesetzt, die Montagesequenzen hinsichtlich Kriterien, wie die Baugruppenstabilität oder Werkzeugwechsel, zu optimieren.

Nach der Generierung der optimierten Montagesequenzen wurde das 3D-Modell nochmals herangezogen, um die einzelnen Montageschritte auch in Form einer automatisch generierten Montageanleitung zu visualisieren. Validiert wurde die Arbeit in einem dreistufigen Verfahren anhand realer Baugruppen. Hierzu wurden Expertenmeinungen herangezogen und reale Produkte untersucht. Das Resultat sind optimierte, ausführbare Montagesequenzen, die vollkommen automatisch aus dem 3D-Modell generiert werden konnten. Somit wird ein neuartiges Vorgehen zur Generierung von Montagesequenzen aufgrund detaillierter Kriterien, weit über den Stand der Technik hinaus, vorgestellt.

Abstract

This work investigated how assembly planners can be supported in the planning of assembly sequences at an early stage. For this purpose, it was examined how assembly-relevant information can be extracted from a 3D model. Subsequently, a procedure was developed to automatically generate assembly sequences from this information. To this end, two key questions were clarified: What assembly information can be automatically extracted from 3D models and how can assembly sequences be automatically generated from this information?

By accessing the CAD system, all relevant information was extracted directly from the 3D model. Using a novel approach, a wide range of detailed features could be obtained and analyzed. These were used to optimize the assembly sequences with regard to criteria such as assembly stability or tool changes.

After generating optimized assembly sequences, the 3D model was used again to visualize the individual assembly steps in the form of automatically generated assembly instructions. The work was validated in a three-stage process using real assemblies. For this purpose, expert interviews were executed and real products were examined. The result are optimized, executable assembly sequences that could be generated completely automatically from the 3D model. Thus, a novel procedure for the generation of assembly sequences using the most comprehensive criteria, far beyond the state of the art, could be presented.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Produktion ist für den Wirtschaftsstandort Deutschland von elementarer Bedeutung. Es werden Arbeitsplätze geschaffen und die gesamte Volkswirtschaft profitiert von einem hohen Industrieanteil innerhalb Deutschlands (Bauernhansl 2020). Eine Studie des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) bestätigt, dass die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen maßgeblich davon abhängig ist, *„mit technologisch führenden Produkten und einer flexiblen und leistungsfähigen Produktion kundenspezifische Produkte höchster Qualität herstellen zu können“* (Schirrmeister et al. 2003). Produzierende Unternehmen stehen in der heutigen Zeit einer zunehmenden Komplexität in der Produktentwicklung sowie der Produktion gegenüber (Bauernhansl 2020).

Dies geht zum einen darauf zurück, dass Produkte sich zu cyber-physischen Systemen entwickeln, die einen interdisziplinären Entwicklungsansatz erfordern (Broy 2013; Eigner et al. 2014). Zum anderen entwickeln sich die Märkte zunehmend zu Käufermärkten, was zu einer steigenden Transparenz auf den Weltmärkten führt und damit zu einem globalen, steigenden Wettbewerbsdruck. Damit kommt es heute zu globalisierten Wertschöpfungsketten und zur Forderung nach einer deutlich flexibleren Produktion (Dombrowski et al. 2013). Zu einer dieser Kundenanforderungen zählt beispielsweise die individualisierte Massenfertigung von Produkten. Sie führt dazu, dass die Variantenvielfalt kontinuierlich wächst, doch die Anzahl gleichartiger Produkte unterdessen sinkt (Lindemann et al. 2006; Reimche 2017). Damit ist Stückzahl eins für die Produktion keine Seltenheit mehr und führt zu erheblichem Aufwand in der Montageplanung.

Die beschriebenen äußeren Einflüsse wirken sich auf die Montage durch immer kürzere Reaktionszeiten aus, da Informationen schneller aufbereitet und verdichtet werden

müssen, damit Entscheidungen termingerecht getroffen werden können (Spath et al. 2013). Insbesondere Fachkräfte in der Montage werden nun durch die zunehmend veränderten Rahmenbedingungen vor neue Herausforderungen gestellt. Heutzutage beinhaltet die Montage neben einfachen, sich wiederholenden Handgriffen und Tätigkeiten zusätzlich komplexe variierende Montageoperationen, die zu einer steigenden Fehlerrate führen kann (Galaske 2019). Ursachen für diese Fehlerquellen liegen jedoch nicht nur in der neuartigen Komplexität und Variabilität der Produkte, sondern begründen sich auch durch mangelnde Informationen oder Unbestimmtheiten über den tatsächlichen Arbeitsablauf (Claeys et al. 2015). Eine angemessene Unterstützung des Personals durch eine Optimierung ihrer Arbeitsabläufe ist also von elementarer Bedeutung, um eine Steigerung der Produktivität zu erzielen (Wiesbeck 2014). Eine Lösung der genannten Problematiken kann sein, dass ausführliche Montageinformationen bereitgestellt werden (Zäh et al. 2007).

Ersichtlich wird, dass ein Umdenken bei den Unternehmen besonders im Bereich der Montage erforderlich ist. Untersucht man die Produktionskette im Hinblick auf die Montagekosten, so lässt sich erkennen, dass allein die Montage bis zu 50% der Produktionszeit in Anspruch nimmt (Smith 2004; Ben Hadj et al. 2015). Aus finanzieller Perspektive verursacht die Montage, je nach Literatur, bis zu 20% der Produktkosten (Smith 2004; Ben Hadj et al. 2015), ungefähr 70% der Herstellungskosten (Boothroyd et al. 2011; Ou et al. 2013), 80% der Kosten für den gesamten Produktlebenszyklus (Mascle et al. 2008; Hsu et al. 2010) und zwischen 30 und 50% der Lohnkosten (Smith 2004; Ben Hadj et al. 2015). Als Möglichkeiten zur Optimierung dieser Kennzahlen werden in der genannten Forschung eine bessere Montageplanung sowie das Montagedesign hervorgehoben.

Allerdings wird heute noch eine klassische Trennung der Konstruktions- und Montageplanungsphase vorgenommen. Zum Beispiel können wesentliche Angaben, wie die der benötigten Montageprozesse und -sequenzen, erst bei der Montageplanung

bestimmt werden. Abbildung 1.1 veranschaulicht das sogenannte Dilemma der Konstruktion (Ehrlenspiel 2003; Ehrlenspiel et al. 2014; Das Wirtschaftslexikon 2015). So kommt es zwar in der Konstruktionsphase zu einem rasanten Anstieg der Kenntnisse der Produkteigenschaften, jedoch steigen diese auch während der Produktionsvorbereitung und Produktion weiter an. Der konstruktive Freiheitsgrad bzw. die Möglichkeit der konstruktiven Einflussnahme ist mit Abschluss der Konstruktionsphase beendet und kann damit nicht die Erkenntnisse der nachfolgenden Produktentwicklungsphasen (PEP) berücksichtigen und keinen Einfluss auf die Kostenentstehung nehmen.

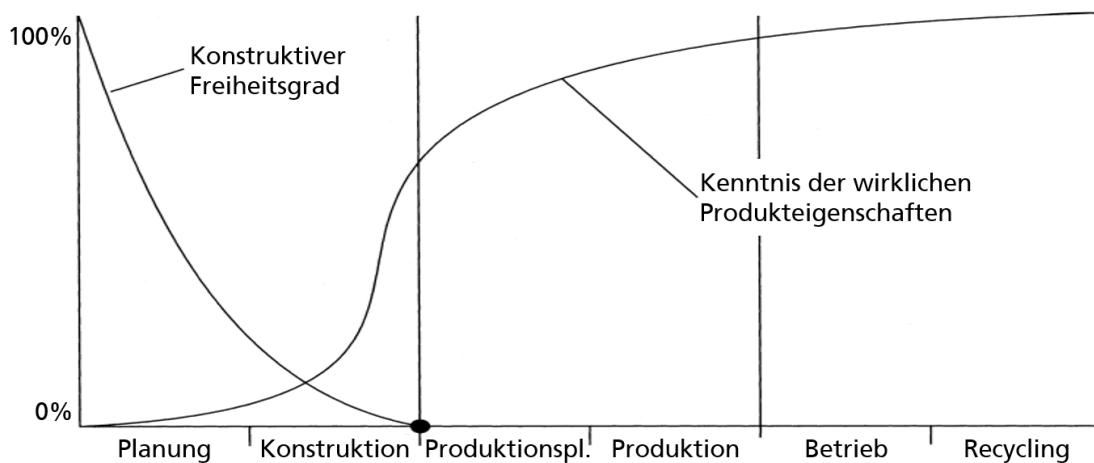


Abbildung 1.1 Dilemma der Konstruktion nach Ehrlenspiel et al. (2003; 2014), eigene Darstellung in Anlehnung an Das Wirtschaftslexikon (2015)

Ein weiteres Beispiel der vernachlässigten Unterstützung bei der Montageplanung ist die fehlende Assistenz bei der Bestimmung der Montageabfolge bzw. Montagesequenz. So ist es noch heute, besonders bei größeren Baugruppen, ein gängiges Vorgehen, Produkte zunächst ohne Regeln durch Experten manuell zusammensetzen, um diese anschließend durch eine dokumentierte Demontage zu untersuchen (Neb 2019). Aus diesem Vorgehen wird schließlich die Montagesequenz abgeleitet. Schnell wird ersichtlich, dass dieses subjektive Verfahren zeit- und kostenintensiv ist und die Identifikation der optimalen Montagesequenz nahezu unmöglich macht.

Weiterhin können die zahlreichen Arbeitsprozesse ausschließlich durch qualifiziertes Fachpersonal durchgeführt werden (Ou et al. 2013). Diese Arbeitsprozesse werden dabei aktuell noch kaum von digitalen Werkzeugen, wie Computer-aided Design (CAD) in der Konstruktion oder Computer-aided Manufacturing (CAM) in der Fabrikation, unterstützt. Dabei bieten gerade die 3D-Modelle der CAD-Systeme eine wertvolle Schnittstelle zwischen den unterschiedlichen Phasen im Produktentwicklungsprozess. Schon heute ist das CAD-System die Grundlage des modellbasierten Entwicklungsprozesses und im Besonderen des Konstruktionsprozesses (Eigner et al. 2014). Dennoch werden diese informationsreichen Modelle im anschließenden Planungsprozess kaum verwendet. Zwar gibt es schon seit Jahren Bemühungen Digital Mock-Ups als Versuchsmodelle für einen durchgehenden PEP zu etablieren, allerdings weißt gerade das Forschungsfeld der Computer-aided Process Planning (CAP bzw. CAPP) noch viele Lücken auf (siehe Kapitel 2.4). So spielen 3D-Modelle bei der Planung der Montage nur eine untergeordnete Rolle.

Dabei beinhaltet das 3D-Modell einer Baugruppe zahlreiche geometrische und topologische Informationen, die als Planungsgrundlage für Montageprozesse dienen könnten (Neb 2019). Der nächste technologische Schritt ist damit, die Montageplaner/-innen schon in der Konstruktionsphase bei der Definition der Montageprozesse zu unterstützen und eine vollumfängliche Montageplanungslösung zu ermöglichen. Mithilfe intelligenter Softwarewerkzeuge sollten Montagepläne bzw. -anleitungen direkt aus vorhandenen 3D-Modellen erzeugt und an Montageplaner/-innen weitergeben werden. Die Vision der vorliegenden Arbeit ist es, eine optimierte Montagesequenz automatisiert auf Basis montagerelevanter Faktoren direkt aus einem 3D-Modell zu generieren.

1.2 Problemstellung

Montageprozesse haben einen wesentlichen Einfluss auf die Herstellkosten von Produkten, da diese einen erheblichen Anteil der Produktkosten und Produktionszeit ausmachen (Smith 2004; Ben Hadj et al. 2015). Eine effiziente Montagesequenz resultiert

in der Reduzierung redundanter Handhabungsprozesse, wie häufiges Ausrichten und Wenden der Baugruppe und ist damit einer der Schlüsselfaktoren für ein kostenoptimales Produkt (Ehrlenspiel et al. 2014; Neb 2019). Zur Bestimmung der Einflussfaktoren für einen optimierten Montageprozess wird daher die Prozessplanung selbst genauer analysiert werden.

Die Prozessplanung beschreibt die Schritte von der ersten Produktidee bis zur eigentlichen Produktion (Hold et al. 2017). Damit ist die Prozessplanung ein elementarer Bestandteil der Produktion. Ausgehend von den benötigten Kenntnissen in der Produktgestaltung sowie in der Produktionsplanung beschreiben Kardos et al. (2016) die automatisierte Prozessplanung als eines der anspruchsvollsten Themen dieses Segments. Zur Lösung dieser Problemstellung muss somit die Überschneidung innerhalb der Forschungsgebiete Konstruktion und Produktion genauer betrachtet werden.

Nicht selten sind mehrere Personen an der Entwicklung eines Produktes beteiligt. Weiterhin haben Konstrukteurinnen und Konstrukteure, basierend auf Erfahrungen und Präferenzen, eigene subjektive Vorstellungen, wie ein Produkt richtig zu montieren ist. Häufig werden jedoch bei der Planung von Montagesequenzen vorteilhafte Sequenzen außer Acht gelassen und Produkte über Produktgenerationen hinweg auf die gleiche ineffiziente Art und Weise montiert. Um dem entgegenzuwirken, ist es notwendig, Montagesequenzen unabhängig von den Erfahrungen und Präferenzen der beteiligten Personen zu bestimmen. Hierfür bedarf es einer Technologie, die in der Lage ist, die besten Montagesequenzen auf Basis nachvollziehbarer Fakten zu berechnen.

1.2.1 Montageplanung

Ausgangspunkt der Montage sind einzelne Bauteile, welche zu einer Baugruppe oder Unterbaugruppe gefügt werden müssen. Mit der fortschreitenden Montage bilden diese

eine Baugruppe mit einer höheren Komplexität (Warnecke et al. 1975). Hierbei ist besonders das Verständnis der Bauteilzusammenhänge und Montage von zentraler Bedeutung. Die Montage beschreibt sämtliche Vorgänge beim Zusammenbau von geometrischen Körpern und hat zur Hauptfunktion das Fügen und damit die Schaffung von Verbindungen zwischen mehreren Bauteilen (Grote et al. 2018). Abbildung 1.2 veranschaulicht die Einteilung der Montagetätigkeiten nach dem jeweiligen Wertschöpfungsgrad nach Lotter et al. (2012), Feldmann et al. (2014) und Galaske (2019). So wird das Fügen der Primärmontage zugeordnet und umfasst Tätigkeiten, die unmittelbar zu einem Montagefortschritt führen und damit schließlich der Fertigstellung des Produkts dienen (Holle 2002; Feldmann et al. 2014). Zu der Sekundärmontage zählen nach der DIN 8580 die Montagevorgänge Handhaben, Kontrollieren, Justieren sowie Sonderoperationen. Im Gegensatz zum Fügen gehören diese Handhabungs- und Hilfsvorgänge allerdings nicht zu den wertschöpfenden Verfahren. Diese sind jedoch aufgrund des jeweilig benötigten Montagevorgangs ein notwendiger Teil der Montage (DIN 8593; Lotter et al. 2012). Handhabungsprozesse beschreiben die räumlichen Veränderungen der Bauteile und damit auch einen Teil des Materialflusses (VDI 2860). Das Kontrollieren definiert die Feststellung der Eigenschaften und Merkmalsausprägungen (Seliger 2020). Der Ausgleich von Abweichungen wird als der Justage bezeichnet und alle weiteren Tätigkeiten als Sonderoperationen (Seliger 2020).

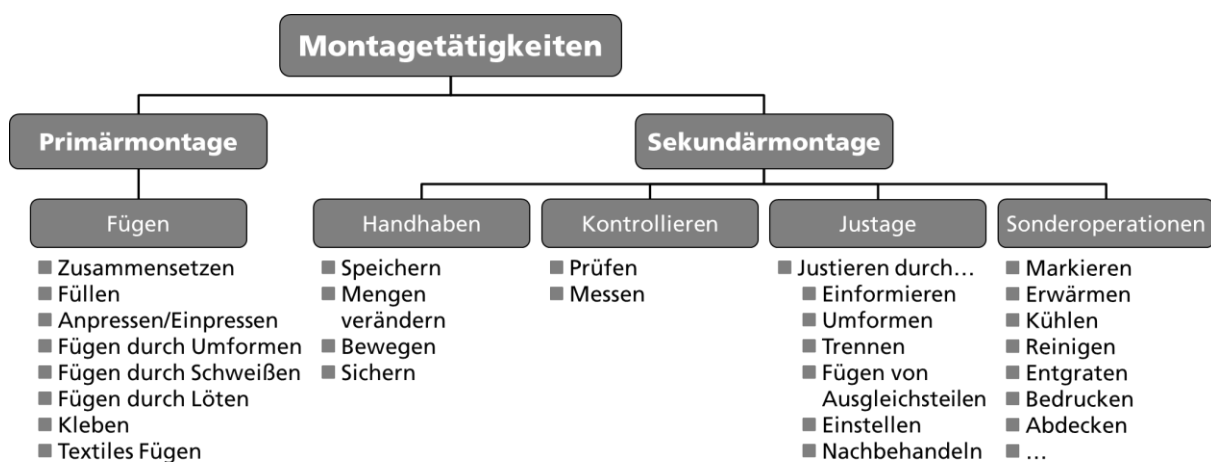


Abbildung 1.2 Einteilung der Montagetätigkeiten nach ihrem Wertschöpfungsgrad in Anlehnung an Lotter et al. (2012), Feldmann et al. (2014) und Galaske (2019)

Im ersten Schritt der Arbeitsvorbereitung ist es die Aufgabe alle relevanten Prozessschritte zu identifizieren und zu strukturieren. Hierbei fungiert die Arbeitsvorbereitung als eine Art Bindeglied zwischen der Konstruktion und der Fertigung (Spur et al. 1997; Jonas et al. 2000). So setzt sich die Arbeitsvorbereitung aus der Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung zusammen. Die Arbeitsplanung wiederum behandelt sämtliche einmalig auftretenden Planungsmaßnahmen, zu welchen auch die Montageplanung gehört (Spur et al. 1997; Patron 2005; Böge et al. 2017).

Der Input für die Montageplanung besteht aus den Informationen der Konstruktion. Aus diesen muss ein detaillierter Montageplan entworfen werden, der in der Lage ist, das Wissen an die Montage weiterzugeben. In der Vergangenheit wurde die Montageplanung, je nach Schwerpunkt und Fokus, sehr unterschiedlich definiert und in verschiedene Ebenen unterteilt. Gemeinsam haben alle Untersuchungen, dass in einer ersten Phase die Ausgangssituation erfasst und analysiert werden muss. Dieses Vorgehen ist bis heute nur mit einem erhöhten Arbeits- und Zeitaufwand zu realisieren (Neb 2019).

Abbildung 1.3 visualisiert den groben Verlauf zur Erhebung von Montageinformationen und der Planung der Montage. So werden aus dem 3D-Modell Stücklisten bzw. sogenannte Bill-of-Materials (BoM) abgeleitet. In diesen Dokumenten finden sich Informationen zu Namen, Abmessungen, Materialien oder Teilenummern. Da diese allerdings keine umfangreichen Informationen zu der Montage beinhalten, müssen diese Dokumente um Modellbeschreibungen und 2D-Bilder in Form von einzelnen Dokumenten ergänzt werden. Für den Austausch der Informationen existiert bis heute noch kein Datenstandard, sodass gegenwärtig der Austausch über Office-Software wie Microsoft Outlook, Word, PowerPoint oder Excel erfolgt. Nicht unüblich ist allerdings auch der Informationsaustausch über verbale Beschreibungen in Besprechungen. Anhand der gewonnenen Informationen muss schließlich die Montage auf Basis dieser Sammlung geplant werden, um beispielsweise weiterführende Instanzen über die erlangten Resultate in Form von Montageanleitungen zu informieren (Wang et al. 2013).

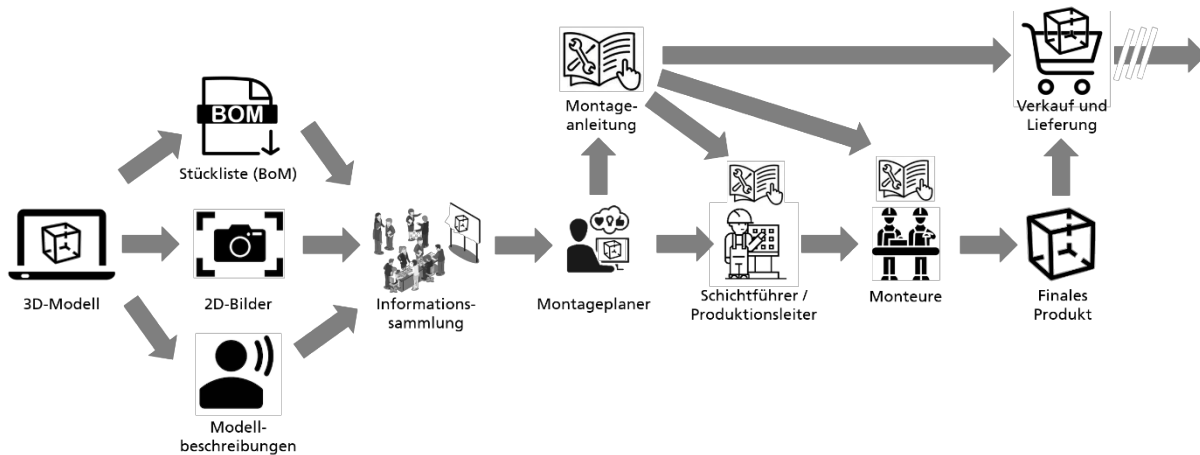


Abbildung 1.3 Heutiges Vorgehen zur Erhebung von Montageinformationen und Erstellung von Montageanleitungen (eigene Darstellung)

Neben dem erheblichen Aufwand für das Sammeln der Montageinformationen ist die Bestimmung der Montagesequenz ein elementarer Bestandteil der Montageplanung und damit die Basis für die weiterführende Fertigungsplanung. Es handelt sich bei der Bestimmung der korrekten Montagesequenz um einen kritischen Prozess, da eine Vielzahl an Faktoren bei der Planung berücksichtigt werden muss. So steigt die Anzahl an Montagesequenzen stark mit der Anzahl der Bauteile in einer Baugruppe an und führt besonders bei großen Baugruppen mit vielen Einzelteilen zu einer unüberschaubaren Anzahl an Montagesequenzen. So beträgt die Anzahl an potenziellen Montagesequenzen bei n Bauteilen für die erste Sequenz n , für die zweite $n-1$, für die dritte $n-2$ etc. Damit ergeben sich $n \cdot (n - 1) \cdot (n - 2) \cdot [...] \cdot 1 = n!$ kombinatorische Montagesequenzen bei n Bauteilen. Damit resultieren für eine Baugruppe mit 5 Bauteilen 120 mögliche Montagesequenzen, bei 10 Bauteilen 3.628.800 und bei 15 Bauteilen schon 1.307.674.368.000 Montagesequenzen.

Es wird schnell klar, dass sich schon bei Baugruppen einer geringen Anzahl an Bauteilen eine unüberschaubare, endliche Zahl an Montagesequenzen ergibt und die Planungskomplexität rapide zunimmt. Dieser rasante Anstieg an zu verarbeitenden Montageinformationen macht es unmöglich, jede Montagesequenz einzeln darzustellen

und zu untersuchen. Bei einer manuellen Planung kann nur ein Bruchteil der möglichen Montagesequenzen betrachtet werden (Bahubalendruni et al. 2016a). Somit besteht der Bedarf für eine effiziente Methodik, um Montagesequenzen zu systematisieren und zu bewerten.

1.2.2 Computergestützte Montageplanung

Eine Möglichkeit zur Reduzierung dieser Zeit- und Kostenaufwände ist die Optimierung der Montageplanung und eine frühzeitige Bestimmung der Montagesequenz bzw. Montierbarkeit der Baugruppen. Schon seit Einzug der Computer in die Produktentwicklung ist die Forschung auf der Suche nach Lösungen für eine computergestützte Montageplanung und selbst heutzutage ist es nach wie vor ein kritisches Thema, was auch die steigenden Publikationszahlen in diesem Forschungsbereich verdeutlichen (Bahubalendruni et al. 2016a).

Das Datenmanagement der konstruierten Baugruppen erfolgt über Produkt-Daten-Management-Systeme (PDM). Diese wurden ursprünglich für die manuelle Verwaltung technischer Dokumente wie Zeichnungen oder Stücklisten entwickelt (Peltokoski et al. 2014). Heute werden PDM-Systeme digitalisiert und verwalten auch 3D-Modelle. Zudem wurden PDM-Systeme um Phasen des Produktlebenszyklus erweitert, sodass heute von Product Lifecycle Management Systemen (PLM) gesprochen wird (Eigner et al. 2014; Peltokoski et al. 2014). Jedoch fehlt auch heute noch die Integration der 3D-Modelle in die Montageplanung.

Die Lücke zwischen der Konstruktion und Montageplanung ist wohlbekannt. So haben sich gerade Anbieter von CAD-Software aus der Konstruktion damit beschäftigt, wie die 3D-Modelle zur Planung der Produktion weiterverwendet werden können. Daraus resultieren Add-ons zu den einzelnen Modellierungswerkzeugen, wie zum Beispiel der

„SolidWorks Composer“. Allerdings handelt es sich bei diesen Softwarelösungen lediglich um Werkzeuge, die es erlauben, manuell Baugruppen zu zerlegen und mit Beschreibungen anzureichern, um im Anschluss Visualisierungen abzuleiten. Der Vorteil liegt damit lediglich in der einfachen Erstellung von Bildschirmaufnahmen und in einer manuellen Darstellung von Vorranggraphen (eine detaillierte Auswertung findet sich in Kapitel 2.4). Es wird ersichtlich, dass in Zeiten der Digitalisierung zunehmend Assistenzen zur Planung, Dokumentation und Ausübung von Montageprozessen benötigt werden.

Als Ausgangspunkt hat sich das 3D-Modell eines CAD-Systems für die Planung der Montage als logisches Element etablieren können (Abbildung 1.3). Schon heute ist es die Grundlage für die Erstellung von Visualisierungen für den Informationsaustausch und es wird als Brücke zwischen CAD-Konstruktion und der computergestützten Montageplanung angesehen (Zhou et al. 2007). So vereinfacht die computergestützte Konstruktion die Wechselwirkung zwischen Mensch und Software, erfordert jedoch gleichzeitig Kenntnisse bei der Erstellung der 3D-Modelle, die für die weitere Planung weiterverwendet werden sollen (Bossmann 2007). Damit ist das 3D-Modell ein Teil der digitalen Produktion und beinhaltet strukturierte Informationen zu relevanten Daten der Produktentstehung (Westkämper et al. 2013).

1.3 Zielsetzung

Durch eine automatisierte Analyse der Montagesequenzen kann den massiven Aufwänden in der Montageplanung entgegengewirkt werden. Dies hilft, die Produktion schon während der Planung zu optimieren. Mit der Reduktion der Vorarbeit bei der Datenaufbereitung und der Montagesequenzgenerierung können

- Planungsfehler minimiert werden,
- Planungsprozesse und Time-to-Production verkürzt werden,
- Personalaufwand und -kosten reduziert werden und

- bestmögliche Montagesequenzen trotz steigender Produktkomplexität und Variantenvielfalt identifiziert werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, 3D-Modelle aus der Konstruktion weiterzuverwenden und damit einen effektiven Wissensaustausch mit der Montageplanung zu ermöglichen (Abbildung 1.4). Durch die Extraktion von Montageinformationen aus einem 3D-Modell eines CAD-Systems soll eine Planungsgrundlage bereitgestellt werden. Weiterhin wird im Rahmen dieser Arbeit ein Leitfaden zur Bestimmung optimierter Montagesequenzen vorgestellt, der zum Verständnis dieses Themengebiets beiträgt.

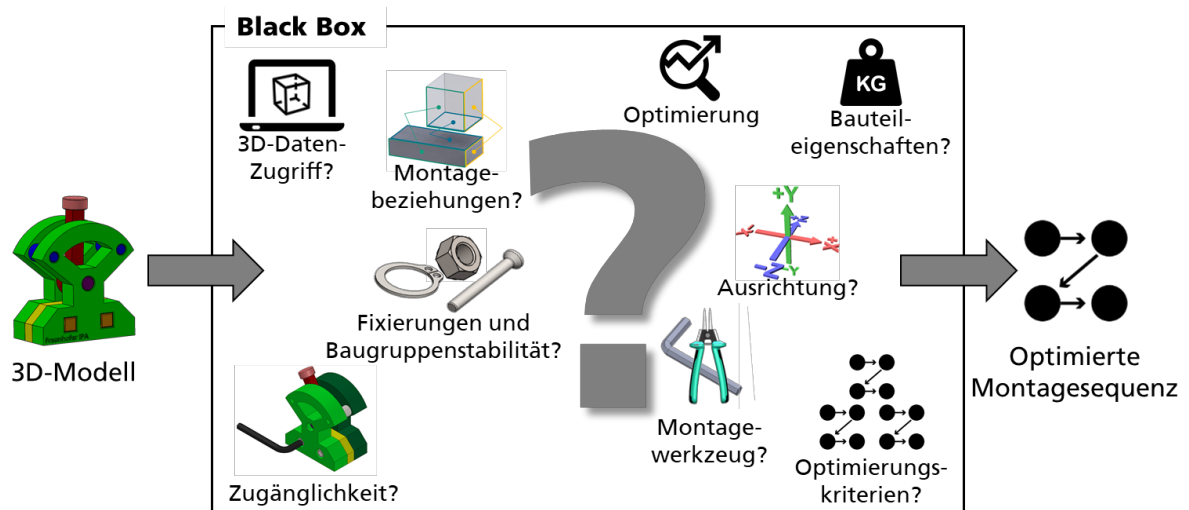


Abbildung 1.4 Herausforderungen der Arbeit

Für die Realisierung des Vorhabens soll eine Methodik ausgearbeitet werden, die systematisiert die damit verbundenen Herausforderungen bearbeitet. Der Duden definiert die Methodik als eine „Wissenschaft von der Verfahrensweise einer Wissenschaft“ (Duden 2022). Im Folgenden wird die genaue Verfahrensweise beschrieben.

1.3.1 Forschungsumfang

Ausgangspunkt der weiteren Untersuchungen ist immer das 3D-Modell, das mithilfe einer CAD-Software erstellt wurde. Bei einem 3D-Modell ist die Rede von einem 3D-Produktmodell einer vollständigen Baugruppe. Weiterhin wird angestrebt, die Extraktion der Montageinformationen und die anschließende Generierung der Montagesequenzen ohne manuellen Einfluss zu realisieren. Die Forschungsziele dieser Arbeit lauten damit:

1. Erarbeitung des Entwicklungsstands und Identifikation von Forschungslücken
2. Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Extraktion der Montageinformationen aus einem 3D-Modell
3. Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Systematisierung der gewonnenen Montageinformationen und Generierung von Montagesequenzen
4. Evaluierung der gewonnenen Montagesequenzen anhand realer Baugruppen und Prüfung auf weiterführendes Einsatzpotenzial

Für eine bessere Übersicht werden in Tabelle 1.1 die beschriebenen Forschungsziele mit einer Kurzbeschreibung der mitgewirkten, bereits veröffentlichten Vorarbeiten zu dieser Arbeit aufgeführt.

Zusammengefasst ist es das Ziel dieser Arbeit, eine Methodik zu entwickeln, die detailliert beschreibt, wie Montagesequenzen aus einem 3D-Modell generiert werden können. Die Methodik beschreibt hierzu eine Verfahrensweise zur Anwendung von Methoden und Modellen durch die Verwendung von Hilfsmitteln (Heyn 1999). Durch die schrittweise Analyse werden im Vorfeld unterschiedliche Ansätze untersucht und herausgearbeitet. Ein Ansatz beschreibt hierbei die Art und Weise, wie an die Aufgabe herangegangen werden kann und verkörpert verallgemeinerte Konzepte.

Tabelle 1.1 Kurzbeschreibung der Forschungsziele und veröffentlichte Vorarbeiten

Forschungsziele	Kurzbeschreibung	Mitgewirkte veröffentlichte Vorarbeiten
1 Erarbeitung des Entwicklungsstandes und Ausarbeitung der Forschungslücken	In den letzten 40 Jahren wurden zahlreiche Ansätze im Forschungsbereich der Montageplanung veröffentlicht. Hierbei unterscheiden sich viele davon grundlegend in der Anwendung und Auswertung. Ziel ist es, eine qualitative Literatur-Übersicht dazu auszuarbeiten.	<ul style="list-style-type: none"> • Neb et al. (2018) • Neb (2019) • Neb et al. (2019) • Neb et al. (2020a; 2020b; 2020c) • Neb et al. (2021d; 2021e) • Trommnau et al. (2020)
2 Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Extraktion der Montageinformationen aus einem 3D-Modell	Der erste Schritt der Montagesequenzgenerierung ist die Gewinnung der Montageinformationen. Bis heute gibt es noch keine allumfassende Methodik, die in der Lage ist, alle relevanten Montageinformationen automatisiert aus einem 3D-Modell zu extrahieren.	<ul style="list-style-type: none"> • Neb (2019) • Neb et al. (2020a; 2020b; 2020c) • Neb et al. (2021e) • Fechter et al. (2019)
3 Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Systematisierung der gewonnenen Montageinformationen und Generierung von Montagesequenzen	Nach heutigem Stand gibt es zahlreiche theoretische Ansätze zur Bestimmung von Montagesequenzen, die nicht zu realisieren sind. Ziel ist es, eine geeignete Methodik auszuarbeiten, die in der Lage ist, mit den extrahierten Montageinformationen aus dem 3D-Modell optimierte Montagesequenzen zu generieren.	<ul style="list-style-type: none"> • Neb (2019) • Neb et al. (2021d)
4 Evaluierung der gewonnenen Montagesequenzen anhand realer Baugruppen und Prüfung auf weiterführendes Einsatzpotenzial	Nach der erfolgreichen Entwicklung einer Methodik zur Generierung von Montagesequenzen soll diese anhand realer 3D-Baugruppen evaluiert werden. Weiterhin soll das weiterführende Einsatzpotenzial untersucht und bewertet werden.	<ul style="list-style-type: none"> • Neb et al. (2018) • Neb et al. (2019) • Neb et al. (2020c) • Neb (2021) • Neb et al. (2021a; 2021b; 2021c) • Seeber et al. (2021) • Beck et al. (2021)

1.3.2 Forschungsfrage und Bezugsrahmen

Mithilfe der zu entwickelnden Methodik sollen Montageplaner/-innen bei der Bewertung von Montageprozessen unterstützt werden. Damit soll unmittelbar zur Optimierung der Montagesequenz beigetragen werden. Basierend auf dieser Vision und dem definierten Forschungsumfang lässt sich die folgende Forschungsfrage ableiten:

***Wie können optimierte Montagesequenzen automatisiert aus 3D CAD-
Modellen generiert werden?***

Weiterhin geben sich die folgenden Nebenforschungsfragen:

- *Welche Montageinformationen können automatisiert aus 3D-Modellen extrahiert werden?*
- *Wie können Montagesequenzen aus den Montageinformationen generiert, bewertet und optimiert werden?*
- *Wo liegen die Grenzen der Methodik?*
- *Wie können die extrahierten Montageinformationen und Montagesequenzen weiterverwendet werden?*

Der Bezugsrahmen wird in Form von Annahmen und Richtlinien definiert. Der Bezugsrahmen dieser Arbeit ergibt sich wie folgt:

1. Bei einem 3D-Modell handelt es sich um das native Datenformat eines IST-Zustands einer Baugruppe, das nicht weiter angepasst werden soll und keine Fehler oder Interferenzen beinhaltet.
2. Der mechanische Zusammenbau muss möglich sein und ausschließlich aus festen und starren Bauteilen bestehen, die keiner Formänderung oder Reibung bei der Montage bzw. Demontage unterliegen.

3. Bei der Vormontage einer Unterbaugruppe bleibt diese in einem formstabilen Zustand, bis es zur Montage der Unterbaugruppe kommt.
4. Eine Montagesequenz ist reversibel und führt in umgekehrter Reihenfolge zur Demontage, daher werden dauerhafte Fügeverfahren nicht berücksichtigt.

1.3.3 Wissenschaftstheoretische Einordnung

Die vorliegende Arbeit ist nach den Eingliederungen der Wissenschaftssystematik von Ulrich et al. (1976) den Ingenieurwissenschaften und damit den Realwissenschaften zuzuordnen. Somit gilt, dass die Resultate der Arbeit jederzeit nachweisbar sind und nach bestimmten Regeln durchgeführt werden müssen (Ulrich et al. 1976). Der Fokus des methodischen Vorgehens ist die Beschreibung, Erklärung sowie Gestaltung empirisch wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte (Ulrich et al. 1976). Abbildung 1.5 visualisiert die Wissenschaftssystematik von Ulrich et al. (1976) und veranschaulicht die Einordnung der vorliegenden Arbeit in die „angewandten“ Handlungswissenschaften.

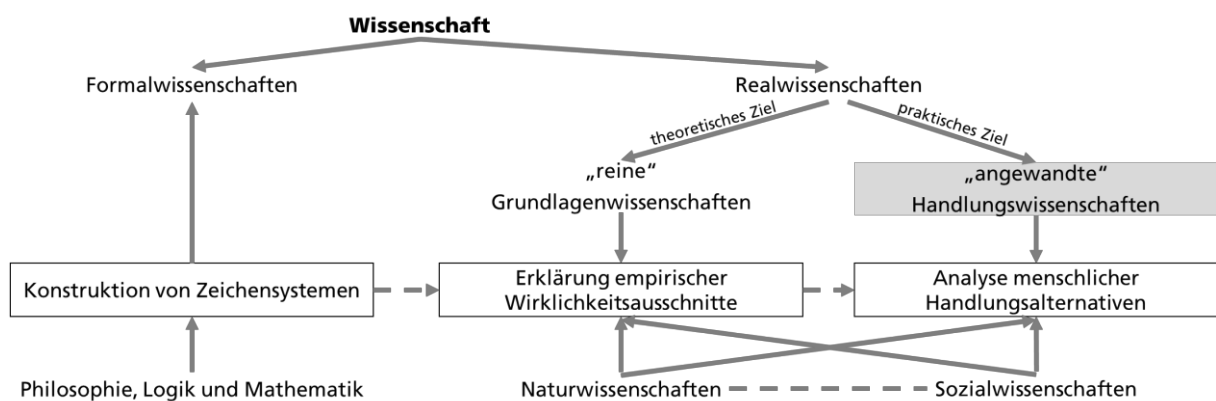


Abbildung 1.5 Einordnung der Arbeit nach der Wissenschaftssystematik von Ulrich et al. (1976) in eigener Darstellung

Im Gegensatz zu den Grundlagenwissenschaften, welche sich auf theoretische Problemlösungen limitieren, behandeln angewandte Handlungswissenschaften Probleme mit einem Praxiszusammenhang (Kubicek 1976). Zur Erforschung dieser praxisorientierten

Problematiken hat Tomczak (1992) eine autonome Forschungsmethodologie, genannt „explorative Forschung“, ausgearbeitet. Die Absicht der „explorativen Forschung“ ist es, wissenschaftliche Systeme zu konzipieren, welche bei der Entscheidungsfindung bei Handlungsalternativen unterstützend mitwirken (Kromrey 2002).

Weiterhin ist zu beachten, dass die Realwissenschaften immer den zwei Grundlagenproblemen, der Subjektivität der Wahrnehmung und der sprachlichen Verallgemeinerung, entgegenstehen (Ulrich et al. 1976). Zudem hängt laut Kuhn (2014) der wissenschaftliche Fortschritt maßgebend von der Anwesenheit allgemeingültiger und zentraler Grundmodelle ab, welche der Wissenschaft die Begriffe, Fragestellungen und Lösungsverfahren darbieten. Unter solchen Grundmodellen versteht Kuhn (2014) Paradigma-, Forschungs- und Erkenntnisprogramme.

Ausgehend von dem Ziel der automatischen Generierung von optimierten Montagesequenzen aus einem 3D-Modell lässt sich die vorliegende Arbeit dem confirmatorischen Teil der Forschung zuordnen. In Kapitel 1.3.1 wurde hierzu der Forschungsrahmen definiert. Anschließend wurden in Kapitel 1.3.2 Forschungsfragen sowie Bezugsrahmen hergeleitet. Dabei gilt es, Erkenntnisse aus der vorhandenen Forschung zu ziehen und die Methodik entsprechend des Bezugsrahmens auszuarbeiten. Zu diesem Zweck eignet sich die analytisch-deduktive Herangehensweise, welche auf den Aktivitäten „Modellkonstruktion“, „Ableitung von Prognosen“ und „Transformation in situationsspezifische Handlungsanweisungen“ beruht (Ulrich et al. 1976; Fechter 2021).

1.4 Aufbau der Arbeit

Zur Handhabung der Gesamtkomplexität und Realisierung des vorgestellten Vorhabens wurde ein strukturiertes Vorgehen ausgearbeitet und in Abbildung 1.6 visualisiert. **Kapitel 1** dient der Einleitung und Bildung eines Grundverständnisses der

Problemstellung. **Kapitel 2** behandelt die Fortschritte und Herausforderungen, die aus der Forschung der letzten 40 Jahre resultieren. Unterteilt werden die Themengebiete in theoretische Ansätze und Schnittstellen zu den 3D-Modellen. Aus den Folgerungen des Stands der Technik wird schließlich ein Konzept in **Kapitel 3** entwickelt. Dieses wird folglich das Grundgerüst für die weiteren Untersuchungen darstellen und die Potenziale hervorheben. **Kapitel 4** stellt die neue Lösung für die Generierung von Montagesequenzen aus einem 3D-Modell dar. Hierbei wird ein Vorgehen ausgearbeitet, welches heutige Problemstellungen adressiert und über den Stand der Forschung hinausgeht. In **Kapitel 5** wird anschließend eine Validierung der Arbeit durchgeführt. Hierzu werden drei unterschiedliche Analysen ausgeführt, um ein ganzheitliches Ergebnis der Arbeit zu liefern. Abschließend wird in **Kapitel 6** eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick auf weiterführende Anknüpfungspunkte gewährt.

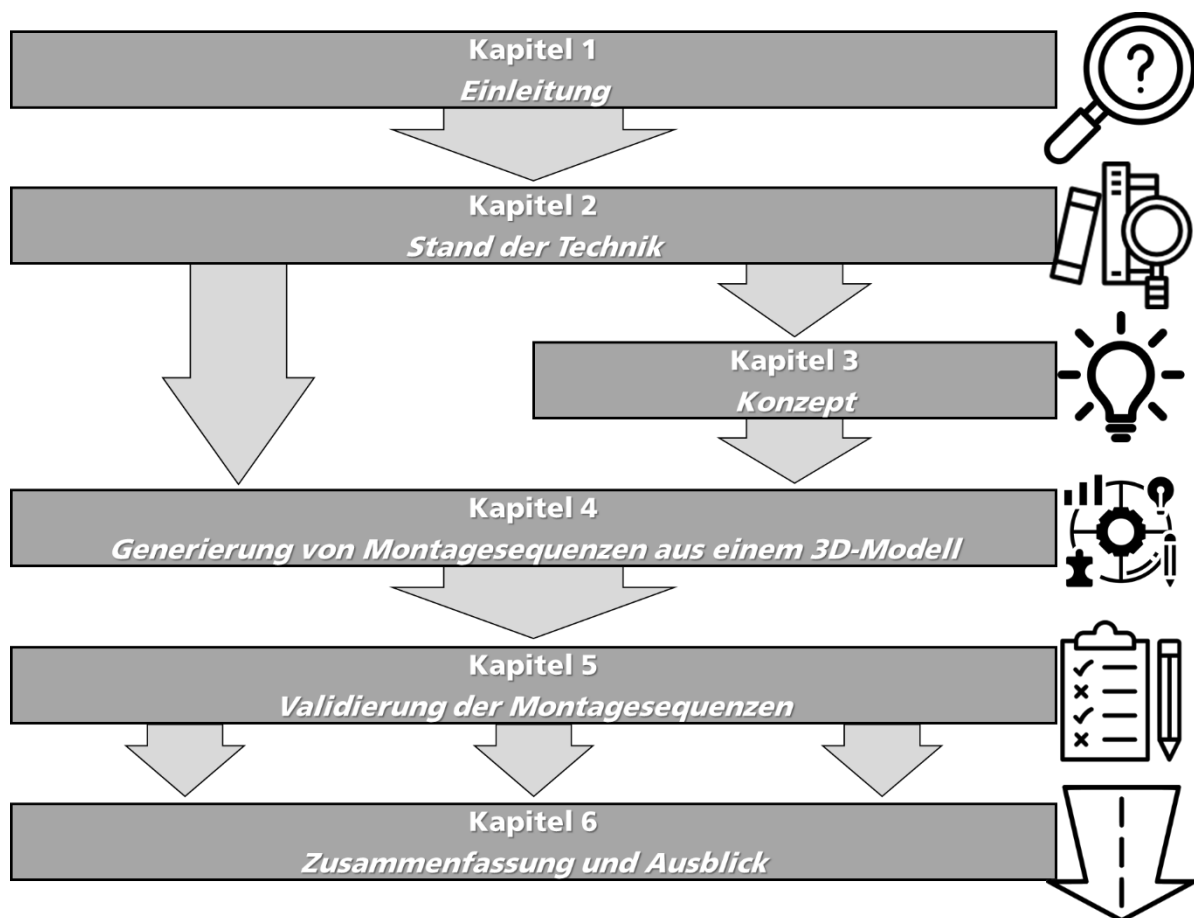


Abbildung 1.6 Aufbau der Arbeit

2 Stand der Technik

Schon seit mehr als 40 Jahren befassen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unterschiedlicher Themengebiete mit Lösungsansätzen und Strategien zur Planung von Montagesequenzen. Die Art der Umsetzung hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Methodik der Auswertung und die Qualität der Lösung (Eng et al. 1999). Es ist nicht verwunderlich, dass sich unterschiedliche Lösungsansätze und -methoden für die computergestützte Montageplanung ergeben haben. Allerdings weisen nur wenige Vorarbeiten eine Schnittstelle zu den in der Konstruktion vorhandenen 3D-Modellen auf. Somit sind die meisten der vergangenen Arbeiten in theoretische Ansätze einzuordnen und lassen sich nicht ohne eine manuelle Vorarbeit lösen. Nichtsdestotrotz haben sich über die Jahre Aufschlüsse über eine mögliche Lösung ergeben.

Aufbauend auf den definierten Forschungslücken wird in Abbildung 2.1 das Vorgehen zur Analyse der Ergebnisse aus der Literatur beschrieben. Kapitel 2.1 beginnt mit den Ansätzen zur Montagesequenzgenerierung. Hierbei wird ersichtlich, dass viele dieser Arbeiten nicht das Potenzial aufweisen, automatisiert aus einem 3D-Modell implementiert zu werden. Aus diesem Grund werden die gewonnenen Erkenntnisse in Kapitel 2.2 daraufhin untersucht, wie Montagesequenzen abgeleitet werden können. Im Anschluss wird in Kapitel 2.3 schließlich geprüft, ob die geforderten Informationen auch automatisiert aus 3D-Modellen extrahiert werden können. Hierbei soll geprüft werden, wie die gefundenen Ansätze auf eine CAD-Schnittstelle angewendet werden können. In Kapitel 2.4 werden schließlich die Ergebnisse mit heute verfügbaren Lösungen verglichen.

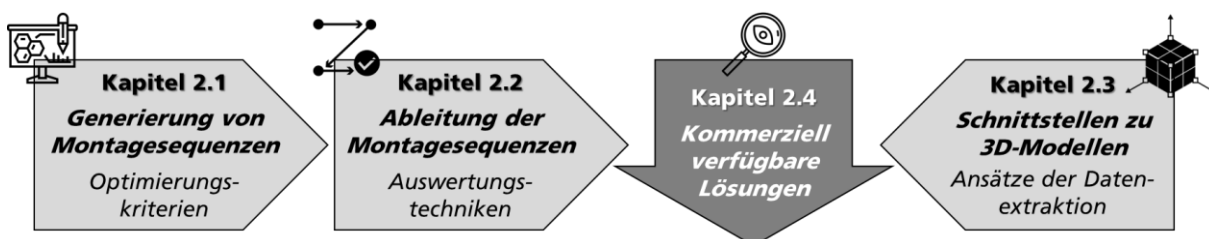


Abbildung 2.1 Aufbau des Kapitels „Stand der Technik“

2.1 Generierung von Montagesequenzen

Über die letzten Jahrzehnte sind unterschiedliche Ansätze zur Generierung von Montagesequenzen entstanden. Um eine diesbezügliche Übersicht zu erhalten, sortierte Bahubalendruni diese Ansätze nach Attributen der Montagesequenzgenerierung. Im Folgenden wird die Systematisierung von Bahubalendruni et al. (2016a, 2016b) aufgegriffen und erweitert. Abbildung 2.2 veranschaulicht die Unterteilung der Montagesequenzgenerierung als Kreismodell.

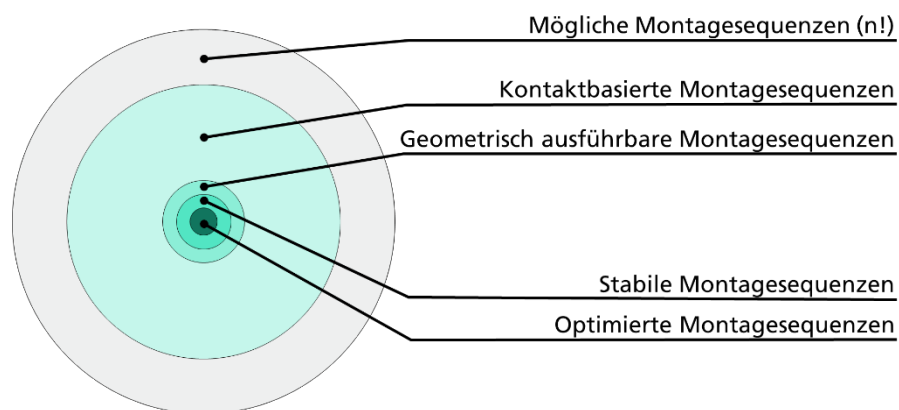


Abbildung 2.2 Ordnung von Montagesequenzen, eigene Darstellung in Anlehnung an Bahubalendruni et al. (2016a)

Der äußere Kreis stellt die Menge aller möglichen Montagesequenzen $\{n!\}$ dar. Unter diesen Sequenzen befindet sich eine Vielzahl unrealistischer Montagesequenzen (graue Kreisfläche). Damit findet die Analyse der Montagesequenzen in einem unüberschaubaren endlichen Lösungsraum statt und bedarf einer Vorfilterung, um optimierte Montagesequenzen ermitteln zu können (Wang et al. 2013).

Die zweite Kreisfläche veranschaulicht die kontaktbasierten Montagesequenzen. Von kontaktbasierten Montagesequenzen ist die Rede, wenn die Sequenzen ausschließlich durch den geometrischen Kontakt, also die Berührung von Bauteilen untereinander, beschrieben werden. Basierend auf den Veröffentlichungszahlen, stellen diese den

Hauptteil der Ansätze zur Montagesequenzgenerierung dar. Ersichtlich wird allerdings, dass die Kreisfläche der kontaktbasierten Montagesequenzen immer noch einen Großteil an geometrisch und mechanisch unmöglichen Montagesequenzen enthält und damit im Verhältnis zu allen möglichen Montagesequenzen immer noch sehr groß ist.

Die dritte Kreisfläche beschreibt die ausführbaren Montagesequenzen. Hierbei kann zwischen einer geometrischen und einer mechanischen Ausführbarkeit unterschieden werden (Bahubalendruni et al. 2016a). Von einer geometrisch ausführbaren Montagesequenz wird gesprochen, wenn eine kollisionsfreie Montage aller Bauteile möglich ist und zum Endprodukt der Baugruppe führt. Eine mechanisch ausführbare Montagesequenz beschreibt zudem noch die Zugänglichkeit der benötigten Montagewerkzeuge. In der Vergangenheit war allerdings die Betrachtung der benötigten Werkzeuge meist nicht möglich, da es sich hierbei um eine Information handelte, die nicht automatisiert aus einer Baugruppe extrahiert werden konnte. Nach der Definition von Marian et al. (2003) ist die mechanische Ausführbarkeit allerdings auch nur als eine erweiterte Form der geometrisch ausführbaren Montagesequenz zu werten, da diese die gleichen geometrischen Anforderungen erfüllen muss wie eine kollisionsfreie Montage.

Die vierte Kreisfläche beschreibt die Montagesequenzen mit einem zusätzlichen Stabilitätskriterium. Montagesequenzen erfüllen dieses Kriterium, wenn die Baugruppe nach der Bauteilmontage stabil ist und trotz Schwerkrafteinflüssen in Position bleibt.

Die letzte Kreisfläche veranschaulicht die optimierten Montagesequenzen. Von einer einzelnen optimalen Montagesequenz kann hier allerdings nicht die Rede sein, da optimierte Montagesequenzen abhängig von deren Optimierungskriterien sind. Somit führen unterschiedliche Optimierungskriterien auch zu unterschiedlichen Montagesequenzen. Nichtsdestotrotz handelt es sich bei den Montagesequenzen in dieser Kreisfläche um valide, geometrisch realisierbare und stabile Montagesequenzen,

die individuell optimiert wurden und somit eine vorteilhafte Montagesequenz aus der Gesamtmenge darstellen.

2.1.1 Kontaktbasierte Montagesequenzen

Kontaktbasierte Montagesequenzen sind Montagesequenzen, die lediglich auf Kontaktinformationen zwischen den Bauteilen basieren. Diese Kontaktinformationen beschreiben in der Regel Berührungspunkte zwischen Bauteilen, ohne auf die Art des Kontaktes einzugehen. Diese kontaktbasierten Informationen werden zumeist als Liaison-Graphen dargestellt. Liaison-Graphen sind Modelle, die aus Knoten und Kanten dargestellt werden und eine graphische Darstellung der Verknüpfungen zwischen den Bauteilen einer Baugruppe darstellen (Bahubalendruni et al. 2016a). Diese graphische Darstellungsform wurde von Bourjault (1988) und Fazio et al. (1987) ausgearbeitet und popularisiert. Hierbei repräsentieren Knoten die Bauteile, während die Kanten die Kontakte bzw. Liaisons zwischen den Bauteilen darstellen. Zur Veranschaulichung visualisiert Abbildung 2.3 eine Baugruppe und einen Liaison-Graph mit den drei Bauteilen (A), (B) und (C). Hierbei hat jedes Bauteil einen gemeinsamen Kontakt und führt zu den drei Kontakt-Liaisons L1, L2 und L3.

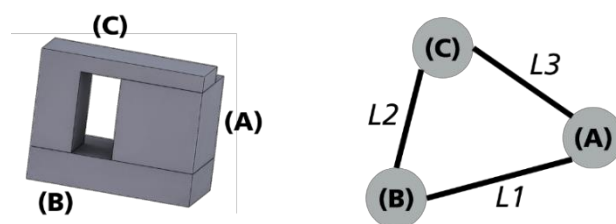


Abbildung 2.3 Baugruppe mit drei Bauteilen und drei Kontakt-Liaisons

Eine der ersten Methoden der Planung von Montagesequenzen stammt von Lieberman et al. (1977). Hierbei handelte es sich um einen sprachbasierten Ansatz, der die Beziehungen zwischen den Bauteilen in Form von Beschreibungen wie „IS ALIGNED WITH“, „ATTACHING“ oder „CONTACTS“ ausdrückte. Ergänzend dazu wurden auch

Prozessbeschreibungen wie „LIFT“, „INSERT“ oder „MOVE“ verwendet, um die Montageprozesse zu beschreiben. Ziel dieser Modellierung war es, Montageprozesse einheitlich und systematisiert zu beschreiben (Lieberman et al. 1977). Ergänzt wurde dieses Vorgehen schließlich von Popplestone et al. (1978), die neben den Prozessbeschreibungen auch noch topologische Beschreibungen integrierten.

Eine erste Methode, die in der Lage war, eine Montagesequenz direkt auszugeben, präsentierte schließlich Bourjault (1988), welcher unterschiedliche Beziehungen zwischen den Einzelteilen der Baugruppe darstellte. Beruhend auf diesen Beziehungen wurde eine Vielzahl an Ja-Nein-Fragen generiert. Anschließend wurden aus den Antworten dieser Fragen die möglichen Montagesequenzen ermittelt. Ein Nachteil dieser Methode war, dass die Software schon bei kleinen Baugruppen zu sehr vielen Fragen führte und damit sehr zeitaufwendig in der Umsetzung war. Allerdings bot diese Vorgehensweise die Basis für weitere Forschungen.

Parallel dazu optimierten Fazio et al. (1987) diese Methode, indem sie die Zahl der Fragen reduzierten. Somit konnten nun auch komplexere Produkte in Betracht gezogen werden. Nichtsdestotrotz war der Aufwand für die Umsetzung immer noch sehr hoch, sodass Heemskerk et al. (1989) das neue Verfahren zusätzlich noch mit einer heuristischen Vorgehensweise in mehreren Phasen verbesserten.

Bis zu diesem Zeitpunkt war der Fokus der Montagesequenzgenerierung lediglich die Aufwandsreduzierung bei der Informationssammlung, da eine automatische Generierung der Fragen noch nicht möglich war. Eine erste Revolution auf dem Gebiet der computer-assistierten Montageplanung wurde schließlich von Homem de Mello et al. (1990) veröffentlicht. Erstmals konnten aus einem Modell geometrische Informationen identifiziert werden. Genutzt wurde hierbei die „Assembly-by-disassembly“-Methode. Diese besagt, dass wenn eine Baugruppe demontiert werden kann, diese Baugruppe auch

in umgekehrter Weise wieder montiert werden kann. Somit war der Ausgangspunkt der Untersuchungen die Demontage einer Baugruppe. Ausgewertet wird hierbei alles in dem von ihnen entworfenen AND/OR-Graphen. Dieser Graph beinhaltet eine Darstellung sämtlicher Montageprozesse einer Baugruppe. Zudem können anhand jenes Graphen mögliche Montagesequenzen abgeleitet werden. Auf diese Weise wurde erstmals mithilfe von Graphen automatisch eine durchführbare (nicht optimale) Montagesequenz ermittelt. Zwar konnte dieses Vorgehen einige manuelle Vorbereitungstätigkeiten reduzieren, allerdings erfordert dieses Vorgehen immer noch viel menschliches Expertenwissen bei der Evaluierung und Bewertung der Montagesequenzen.

Im selben Jahr veröffentlichte Delchambre (1990) ein vergleichbares Vorgehen, allerdings mit einem fortschrittlicheren Lösungsalgorithmus. Es kam auch ein Teilsystem zum Einsatz, das Roboterzellen Montageoperationen zuordnete. Auch war es angedacht, diese Arbeit weiterzuentwickeln, indem die Montagepläne weiter optimiert und die benötigten Montageinformation direkt aus einem CAD-System extrahiert werden. Zwar waren diese Untersuchungen zur Zeit ihrer Anwendung futuristisch und vielversprechend, allerdings wurden diese Erwartungen 2013 von Delchambre widerrufen. Hierin beriefen sich Leu et al. (2013) darauf, dass die computer-assistierte Montageplanung an der rasant steigenden Anzahl an Montagesequenzen, dem fehlenden Expertenwissen und der missachteten menschlichen Interaktion scheitere, sodass die Montageplanung zunehmend in den Bereich der Virtual Reality (VR) zu Trainingszwecken rückte. Im Rahmen dieser Arbeit sollen diese Aussagen allerdings relativiert oder bis gänzlich widerlegt werden.

Auch Lee et al. (1990) veröffentlichten auf Basis der ersten Fortschritte eine Methode, die es erlaubte, Montagesequenzen aus einem Liaison-Graphen abzuleiten. Hierbei wurde eine Restriktion aufgestellt, sodass nur Bauteile, die im Kontakt miteinander stehen, montiert werden durften. Somit wurde die Restriktion definiert, dass Bauteile bzw. Knoten nur bei einer direkten Verbindung im Liaison-Graphen gewählt und nur einmal genutzt werden dürfen. Das Ziel dieses Vorgehens ist es, geometrisch unmögliche

Montagesequenzen schon im Vorfeld auszuschließen und gar nicht erst zu betrachten. Zudem wurden zur Vereinfachung des Liaison-Graphen die Bauteile in Unterbaugruppen in Form von geschlossenen Kreisen zusammengefasst. Auch erste geometrische Untersuchungen wurden von Lee et al. (1990) vorgestellt, in dem die Normalvektoren der Kontakte betrachtet wurden. Allerdings war auch dieses Verfahren noch recht fehlerbehaftet und bedurfte einer manuellen Vor- und Nacharbeit, um einzelne Montagesequenzen aus dem entwickelten Graphen abzuleiten.

Viganò et al. (2012) griffen diese graphische Auswertungsmethode mit moderneren Analyse-Methoden auf. Allerdings wurde die Methode nur in einer reduzierten Form übernommen, da ausschließlich die Kontakte zwischen den Baugruppen betrachtet wurden. Neu war jedoch, dass das Startbauteil bzw. Basisbauteil auf Basis eines Kontakt-Indexes ermittelt wurde. In Abbildung 2.4 veranschaulichten Viganò et al. (2012) dies mit dem Anwendungsfall „bolt-nut plate fixing“ und dessen Liaison-Graphen. Damit Montagesequenzen aus dem Graphen generiert werden können, muss zu Beginn ein Startbauteil bestimmt werden. Anschließend muss ein Bauteil gewählt werden, das mit einer Kante mit dem Startbauteil verbunden ist. Dieser Vorgang findet so lange statt, bis wieder das Startteil gewählt werden müsste und beendet so die Montagesequenz. Im Falle der „bolt-nut plate fixing“ kann dies nun mit jedem der sechs Bauteile im und gegen den Uhrzeigersinn durchgeführt werden und führt so zu 12 Montagesequenzen. Mit dieser Methode reduziert sich damit die Anzahl der Montagesequenzen von 720 (6!) auf 12 und schließt damit viele unrealistische Montagesequenzen schon im Vorfeld aus. Nichtsdestotrotz finden sich auch unter den 12 Montagesequenzen weiterhin ungültige Sequenzen, jedoch keine unmöglichen. Dennoch standen Viganò et al. (2012) auch vor der Problematik dieser Methode, dass durch komplexere Baugruppen unzählige Montagesequenzen entstehen würden, und sie damit nur noch bedingt brauchbar wäre. Demnach stellte dies ein sehr vielversprechendes Konzept dar, das sich hervorragend eignete, um es mit weiteren Liaisons zu ergänzen und mit einem regelbasierten Algorithmus zu analysieren. Alternative Ansätze zur Bestimmung von Kontaktkriterien,

wie von Tao et al. (2017) über einen Facettenabgleich oder datenbankbasierte Ansätze wie Mandolini et al. (2018), führten zu deutlich schlechteren Ergebnissen und waren ebenfalls an diese Limitierungen gebunden.

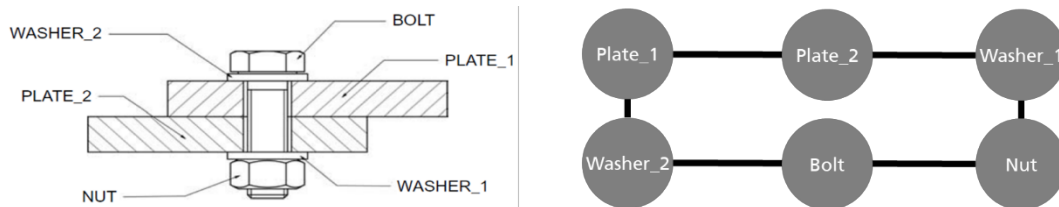


Abbildung 2.4 „Bolt-nut plate fixing“ und Liaison-Graph, eigene Darstellung in Anlehnung an Viganò et al. (2012)

2.1.2 Geometrisch ausführbare Montagesequenzen

Bei geometrisch ausführbaren Montagesequenzen handelt es sich um Montagesequenzen, die sich kollisionsfrei montieren lassen. Einen der ersten Meilensteine in diesem Forschungsgebiet veröffentlichten Dini et al. (1992) durch verbesserte Auswertungen und Analysemethoden der Montagesequenzplanung. Nach ihrer Methode wurde der gesamte Prozess zur Ermittlung der Montagesequenzen automatisiert, indem die geometrischen Produktinformationen manuell bereitgestellt wurden. Der Algorithmus basiert auf drei Matrizen. Jede Matrix enthielt bestimmte Informationen bezüglich der sechs möglichen Montagerichtungen eines kartesischen Koordinatensystems. Abbildung 2.5 veranschaulicht ein Beispiel einer solchen Baugruppe und der daraus resultierenden Matrizen. Erstellt wurden die Interferenz-, Kontakt- und Verbindungsmatrizen durch eine Kollisionsanalyse entlang der jeweiligen Koordinatenachse. Damit war es erstmals möglich, automatisch Montagesequenzen zu ermitteln. Nichtsdestotrotz war dieses Vorgehen noch recht fehleranfällig und es erforderte erhebliche Vorarbeit, um die Matrizen zu befüllen. Weiterhin ist es auch nach wie vor nicht möglich, optimale Montagesequenzen zu ermitteln und auch die Durchführung wurde nie näher beschrieben.

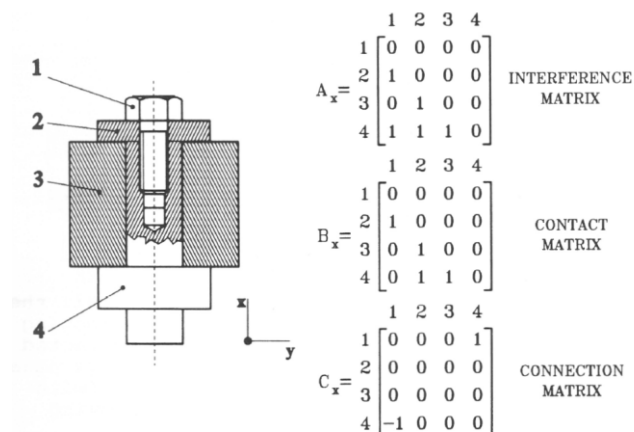


Abbildung 2.5 Methode zur Ableitung geometrisch ausführbarer Montagesequenzen (Dini et al. 1992)

Mok et al. (2001) und Pan et al. (2006b) griffen dieses Vorgehen auf und generierten die Interferenzmatrizen durch die Nutzung eines CAD-Austauschformats. Hierbei werden die Bauteile auf eine 2D-Ebene projiziert und entlang des Koordinatensystems der Baugruppe bewegt. Somit müssen sechs unterschiedliche Richtungen untersucht und ausgewertet werden ($\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$). Die Kollisionsanalyse untersuchte schließlich Überschneidungen der Projektionen und speicherte diese als geometrische Restriktionen in einer Interferenzmatrix. Diese Interferenzmatrizen bilden anschließend die Basis für die Bestimmung der Montagesequenzen. Das Verfahren war aufgrund der Verwendung von ersten 3D-Informationen auf Basis von 2D-Projektionen wegweisend. Allerdings war das Vorgehen auch fehleranfällig, da es nicht ausreichte, sich lediglich auf die Koordinatenachsen zu fokussieren. Weiterhin führte die Reduktion der 3D-Modelle auf 2D-Projektionen bei größeren Baugruppen nahezu immer zu Überschneidungen mit der Gesamtbaugruppe und damit zu fehlerhaften Interferenzmatrizen.

Eine modernere Form dieser Analyse ist die Realisierung in dreidimensionaler Form. Einer der ersten Ansätze zur Ermittlung geometrischer Montagerestriktionen wurde von Sundaram et al. (2001) vorgestellt. Die generelle Machbarkeit konnte damit zwar erbracht werden, jedoch wurden in dieser Arbeit viele Herausforderungen bei der Umsetzung und Rechenleistung beschrieben. Su (2007) optimierte die 3D-Analyse schließlich, indem kollisionsfreie Montagepfade direkt aus einem CAD-System ermittelt wurden. Jedoch war

dies nur für die Umsetzung sehr einfacher Baugruppen mit Demontagebewegungen innerhalb der Koordinatenachsen ausgelegt. Briceno et al. (2007) und Thomas et al. (2003) stellten ein Konzept vor, das auch Demontagebewegungen windschief zu den Koordinatenachsen ermöglichte und damit zu genaueren geometrischen Restriktionen für die Montageplanung führte. Doch auch diese Ansätze waren noch sehr spezifisch und an die verfügbare Rechenleistung gebunden. Zur Umgehung dieser Herausforderungen entwickelten Hsu et al. (2010) ein Konzept, das mithilfe zusätzlicher Regeln und einer Nutzerschnittstelle dem Anwender einen direkten Einfluss auf das Ergebnis gestattete.

Aufgrund der zunehmenden Rechenleistung nahm auch die Entwicklung aufwendiger Analysemethoden Fahrt auf. So stellten Bikas et al. (2016) eine mehrstufige Analyse-Methode vor und erfassten damit die geometrischen Restriktionen deutlich präziser. Jedoch scheiterten sie an der unzureichenden Analyse der gewonnenen Ergebnisse und waren damit gezwungen, Demontage-Einschränkungen zu definieren.

Eine Neuheit auf dem Gebiet der Ermittlung geometrischer Restriktionen zur Generierung von Montagesequenzen ist die Verwendung von Algorithmen der Bahnplanung. Angelehnt an die Forschung für die Wegfindung von autonomen Fahrzeugen oder zur Bestimmung von Roboterpfaden, ist es notwendig, kollisionsfreie Wege für die einzelnen Bauteile zu ermitteln. Ein oft verwendeter Algorithmus hierfür ist der Rapidly-growing Random Tree (RRT). Von diesem machten auch Morato et al. (2012) Gebrauch, indem für jedes Bauteil einzeln untersucht wurde, ob und wann es die Baugruppe verlassen kann. Besonders geeignet ist diese Methode, wenn Bauteile komplexe Montagepfade erfordern, die sich nur schwer analytisch beschreiben lassen. Allerdings kann auch nie garantiert werden, dass jederzeit ein Montagepfad, geschweige denn der kürzeste Pfad, gefunden wird. Weiterhin folgt der Algorithmus, wie der Name zu erkennen gibt, einem randomisierten Ablauf und generiert zufällig Knoten in einem iterativen Prozess. Das Vorgehen ist nicht reproduzierbar und kann die Montagesequenzen nur in nicht optimierten Schichtmodellen ausgeben.

Erweitert wurde dieser Algorithmus durch Xiong et al. (2015) mittels der Nutzung eines minimum-cost Rapidly-growing Random Tree (mc-RRT). Hierbei werden die Knoten nicht zufällig bestimmt, es wird schon im Vorfeld eine Anzahl an zufälligen Knoten bestimmt. So wird ein Baum aus den Knoten generiert, der die geringsten Kosten aufweist. Die Kostenfunktion wird hierbei über die euklidische Distanz bestimmt, die von der Startposition über den neuen Knoten zur Endposition führt. Rotationen werden hierbei zwar betrachtet, allerdings ist dies auf eine definierte Anzahl von Rotationen beschränkt, um übermäßige Änderungen zu verhindern. Das Funktionsprinzip des Vorgehens von Xiong et al. (2015) und auch die angestrebte Regulierung der zufälligen Faktoren konnte von den Autoren nachgewiesen werden. Allerdings wurde nie veröffentlicht bzw. nachgewiesen, wie die Montagesequenzen daraus bestimmt werden können und wie erfolgreich deren Generierung war. Aus diesem Grund kann diese Methode nicht besser bewertet werden als der Grundansatz von Morato et al. (2012) und dient lediglich als Referenz für ein alternatives Vorgehen.

Basierend auf den beschriebenen Nachteilen veröffentlichten Ben Hadj et al. (2015) eine erweiterte Methode, die unabhängig von den Koordinatenachsen der Baugruppe angewandt werden kann. Weiterhin führten sie ihre Kollisionsanalysen nicht mehr ausschließlich in den Koordinatenachsen durch, sondern waren auch in der Lage, Kollisionsprüfungen bei geneigten Montageachsen durchzuführen (vgl. Abbildung 2.6). Voraussetzung war hierfür die Identifikation einer solchen geneigten Achse.

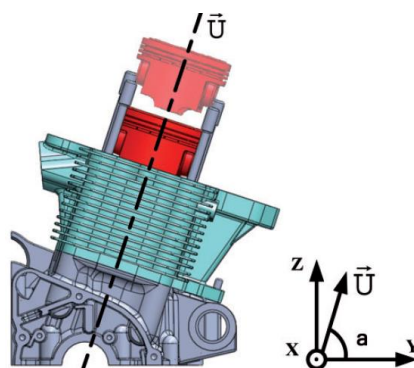


Abbildung 2.6 Beispiel einer geneigten Montageachse (Ben Hadj et al. 2015)

Ein nächstes Konzept von Ben Hadj et al. (2015) war es, zur Reduktion möglicher Montagesequenzen Methoden der kontaktbasierten Montagesequenzgenerierung zu nutzen, indem schon zu Beginn ein Basisbauteil definiert wird, das über Bewertungsfunktionen bestimmt wurde. Formel 2.1 beschreibt die Faktoren zur Bestimmung des Basisbauteils. Hierbei muss das Basisbauteil ein möglichst großes Volumen, größere Kontaktflächen und eine hohe Anzahl an Kontakten aufweisen, laut Ben Hadj et al. (2015). Für die Faktoren α , β und γ gilt hierbei $\alpha + \beta + \gamma = 1$. Wobei V_i und A_i das Volumen und die zugängliche Fläche der einzelnen Bauteile beschreiben. V_a und A_a hingegen beschreiben den Durchschnittswert aus allen Bauteilen der Baugruppe. N_b gibt die bauteilspezifische Anzahl der Kontakte an einem Bauteil mit den restlichen Bauteilen wieder. Das Basisbauteil ist hierbei das Bauteil mit dem höchsten Wert S_i . Zudem wurde auch noch die Anforderung aufgestellt, dass das Basisbauteil an der Arbeitsfläche platziert sein muss und sich nicht bewegen darf.

$$S_i = \alpha * \frac{V_i}{V_a} + \beta * \frac{A_i}{A_a} + \gamma * N_b \quad (2.1)$$

Die durchdachte Bestimmung des Basisbauteils und die Unabhängigkeit der Koordinatenachsen waren fortschrittliche Entwicklungen von Ben Hadj et al. (2015) im Bereich der computerassistierten Montageplanung, allerdings war das Analyseverfahren selbst noch sehr fehleranfällig. Dies ist damit zu begründen, dass das Verfahren lediglich dazu genutzt wird, um freie Montagerichtungen zu identifizieren. Wenn jedoch keine freie Richtung gefunden werden kann, so kann auch keine Montagesequenz ermittelt werden. Bahubalendruni et al. (2016b) versuchten, dies durch ergänzende manuelle Eingaben mithilfe von Nutzerschnittstellen zu lösen, allerdings führte dies zu erheblichen manuellen Vor- und Nacharbeiten. Dieser Fehler macht die Anwendung, besonders bei Baugruppen mit Schrauben, unbrauchbar, da gerade Verschraubungen geometrische Überschneidungen der Gewinde im CAD-Modell aufweisen und damit nicht kollisionsfrei aus einem Modell bewegt werden können. Abbildung 2.7 veranschaulicht dies anhand einer dargestellten Schraubverbindung zwischen Schraube und Mutter. Bei der überschneidenden Fläche handelt es sich hierbei um die jeweiligen Gewinde.

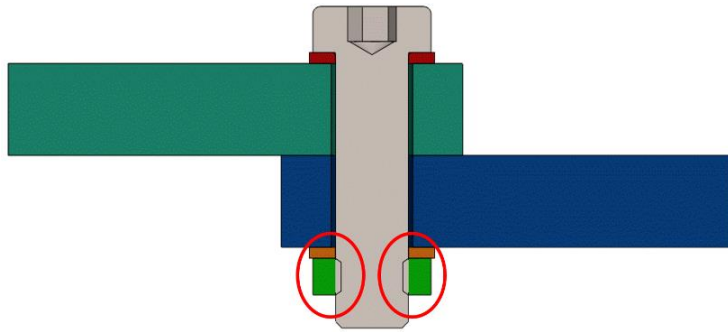


Abbildung 2.7 Schnittansicht einer Überschneidung der Gewindeflächen einer Schraube und Mutter im CAD-Modell

Fixierende Elemente wie Schrauben waren schon immer ein Hindernis für eine automatisierte Planung von Montagesequenzen. Hervorzuheben sind weiterhin axiale Sicherungsringe, da diese nur mit einer Deformation montiert werden können. Diese Deformationen lassen sich allerdings nicht in einem starren Modell abbilden oder analysieren. Abbildung 2.8 veranschaulicht die Einbauposition eines axialen Sicherungsrings in einer Getriebewelle. Hierbei wird ersichtlich, dass der Sicherungsring zur Montage über die Welle, welche einen größeren Durchmesser hat, gespreizt werden muss, bevor dieser in der Einbauposition wieder entlastet werden kann.

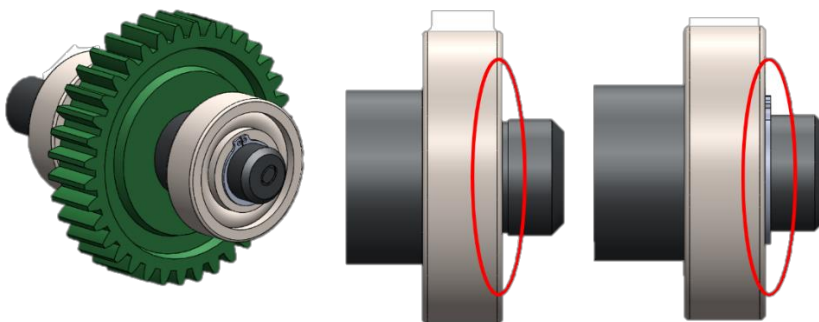


Abbildung 2.8 Verbau und Einbauposition eines axialen Sicherungsrings

Ou et al. (2013) erkannten die Schwierigkeit der Fixierungselemente und begannen Normteile aus Baugruppen zu identifizieren. Allerdings wurde hierzu lediglich eine Texterkennung verwendet, sodass in den Bauteilen, nur nach Schlüsselwörtern wie „bolt“, „screw“ oder „clip“ in den Bauteilnamen gesucht wurde, um Normteile zu

identifizieren. Nach einer erfolgreichen Identifikation konnten die Normteile aus einer Baugruppe automatisiert entfernt werden und mit der geometrischen Analyse über eine Kollisionsanalyse begonnen werden. Pintzos et al. (2016) erweiterten dieses Vorgehen und bestimmten, dass fixierende Normteile erst montiert werden dürfen, wenn die zu befestigenden Bauteile schon gesetzt wurden. Das Vorgehen bei der Analyse der Montagesequenz ist hierbei vergleichbar mit dem Vorgehen von Ben Hadj et al. (2015), jedoch ohne die detaillierte Bestimmung des Basisteils. Ein grundlegender Unterschied ist allerdings, dass Pintzos et al. (2016) die Bauteile in Schichten, ähnlich einer Zwiebel, aufteilen. Immer wenn Bauteile kollisionsfrei demontiert werden können, werden diese aus der Baugruppe entfernt und die Untersuchung beginnt von Neuem. Auch die Normteile werden hierbei nachträglich Schichten zugeordnet. Auf diese Weise werden alle Bauteile der Baugruppe schichtweise eingeteilt. Der Lösungsalgorithmus der Montagesequenzen geht von der innersten zur äußersten Schicht, während Bauteile innerhalb einer Schicht in einer beliebigen Sequenz montiert werden können. Zu kritisieren an diesem Vorgehen ist allerdings, dass die Bestimmung der Bauteilrestriktionen durch die Bildung von Schichten vorgenommen wird. So führt dieses Vorgehen besonders bei größeren Baugruppen zu nicht existenten Montagerestriktionen. Folglich sind inkonsistente Montagesequenzen das Ergebnis, die bei der Montage zu einer gewissen Willkür führen und die Stabilität vernachlässigen. Weiterhin ist auch der Gebrauch einer Texterkennung zur Bestimmung der Normteile fragwürdig, da diese in einem realistischen Umfeld nicht umzusetzen und nicht mit der Benennung von Bauteilen zu vereinbaren ist.

Eine textunabhängige Methode zur Identifikation von Normteilen aus einer Baugruppe wurde mithilfe Künstlicher Intelligenz (KI) von Neb et al. (2020a; 2020b) entwickelt. Umgesetzt wurde dies auf Basis der Voxel-Modell-Analyse von Schönhof et al. (2020). Abbildung 2.9 veranschaulicht das Vorgehen. Die Bauteile werden zu Beginn automatisiert aus einer STEP-Datei in eine STL-Datei konvertiert, um diese anschließend in Voxel-Modelle unterschiedlicher Auflösung zu konvertieren. Anschließend wird mithilfe eines neuronalen Netzes und einer 21-stufigen Klassifikation bestimmt, ob es sich um ein

Normteil handelt und welcher Norm es angehört. Dieses Vorgehen führte zu einem erhöhten Rechenaufwand bei der Analyse, da jedes Bauteil einer Baugruppe klassifiziert werden muss. Jedoch steht anschließend fest, welches der Bauteile einer Norm angehört und wie es zu spezifizieren ist.

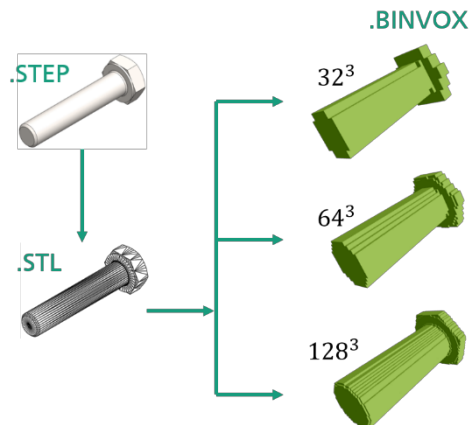


Abbildung 2.9 Klassifikation von Normteilen mithilfe von KI in Anlehnung an Briki (2019b) und Neb et al. (2020b)

Neb et al. (2021e) griffen die Methode von Briki (2019b) und Schönhof et al. (2020) auf und entwickelten auf deren Basis eine geometrische Baugruppenanalyse mithilfe einer Kollisionsanalyse. So konnte schon im Vorfeld bestimmt werden, bei welchen Bauteilen es sich um Normteile handelt und wie mit diesen zu verfahren ist. Beispielsweise werden die Gewindekollisionen bei erkannten Schrauben gespeichert und so hinterlegt, dass diese ignoriert werden können, wenn die Überschneidungen im Toleranzbereich liegen. Ähnlich verhält es sich mit axialen Sicherungsringen. So werden die Montagemöglichkeiten von Sicherungsringen lediglich axial zu ihrer konzentrischen Restriktion gesucht und Kollisionen in einem definierten Toleranzbereich werden ignoriert (Neb et al. 2021e). Die Ermittlung der Analyserichtung und Demontagebewegung ist angelehnt am Vorgehen von Ben Hadj et al. (2015) und in SolidWorks 2018 implementiert. Ausgegeben werden die Ergebnisse hierbei als Präzedenzmatrix. Diese Präzedenzmatrix gibt wieder, welche Bauteile demontiert werden müssen, bevor ein anderes Bauteil demontiert werden kann.

Eine zweite Besonderheit der Methode von Neb et al. (2021e) ist, dass auch zweigliedrige Bewegungen erfasst und untersucht werden. Angelehnt ist die Methode zur Generierung der zweigliedrigen Bewegungen an die Methode von Ou et al. (2013) und Göke (2019), allerdings in einer deutlich schlankeren Form und mit weniger Programmablaufschleifen. Abbildung 2.10 hebt in diesem Kontext die Notwendigkeit einer mehrgliedrigen Bewegung hervor. Zur Montage der Schraube müsste diese erst über die Seite eingeführt werden, damit sie schließlich in Achsrichtung montiert werden kann. Allerdings wäre das Ergebnis einer klassischen geometrischen Untersuchung, dass die Baugruppe nicht montierbar ist, da die Schraube in jeder Demontagerichtung zu einer Kollision führen würde. Ohne eine mehrgliedrige Bewegung wären schon einfache geometrische Untersuchungen nicht in der Lage, brauchbare Montagesequenzen zu extrahieren.

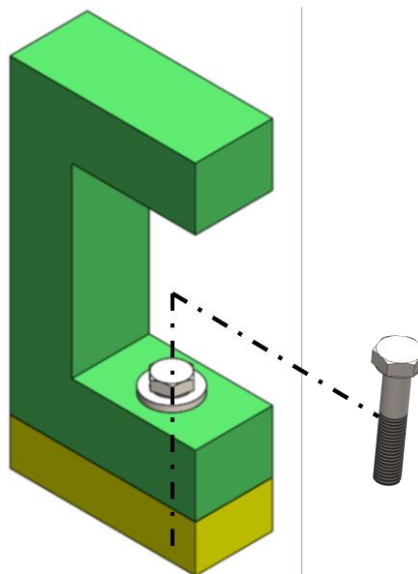


Abbildung 2.10 Benötigte zweigliedrige Bewegung zur Montage einer Schraube in eine C-Schiene, eigene Darstellung in Anlehnung an Neb et al. (2021e) und Göke (2019)

Weitere Lücken wies dieses Vorgehen in der nicht ausgeprägten Betrachtung der Montagestabilität auf, da Montagesequenzen lediglich bei einer Schwerkraftbetrachtung in Richtung des Montagetisches möglich sind und damit nicht gedreht werden können. Das Resultat ist, dass dieses Vorgehen bei großen Baugruppen zu sehr hohen Rechenzeiten und fehlerhaften Montagesequenzen führt.

2.1.3 Stabile Montagesequenzen

Stabile Montagesequenzen weisen die zusätzliche Anforderung auf, dass sie nicht nur Kontakte und geometrische Restriktionen zwischen den Bauteilen einbeziehen, sondern auch prüfen, ob die montierten Bauteile auch nach der Montage am Platz bleiben. Hierfür muss die Schwerkraft berücksichtigt werden und damit eine Schwerkraftrichtung bestimmt und in die Analysen miteinbezogen werden (Ghandi et al. 2015). Mithilfe von Stabilitätskriterien sollen nur Montageoperationen betrachtet werden, die auch schwerkraftstabil zu realisieren sind.

Smith et al. (2001) entwickelten hierfür eine erste Methode, der Stabilitätskriterien in einer sogenannten Stützmatrix gespeichert werden. In dieser Matrix wird gespeichert, ob Bauteile mit einem Verbindungselement, wie mit einer Schraube, verbunden sind. Aus dieser Matrix kann schließlich geschlossen werden, für welche Schwerkraftrichtung eine Montage stabil ist und zu welchem Montagezeitpunkt dies zutrifft. Diese Information wird schließlich bei der Generierung der Montagesequenzen in Betracht gezogen. Die Stützmatrix wird allerdings nur für eine Schwerkraftrichtung bestimmt; damit sind Rotationen oder Orientierungswechsel nicht zu betrachten. Weiterhin wurden die Matrizen manuell befüllt und gaben lediglich einen Aufschluss darüber, ob eine Fixierung vorliegt oder nicht. Fehlende Fixierungen bzw. instabile Baugruppen werden damit bei der Bildung der Montagesequenzen nicht berücksichtigt.

Eine indexbasierte Methode entwickelten Xiaoming et al. (2007). Sie bewertet alle Montageoperationen durch einen „Stability State Index“ und „Total Stability Index“. Der „Stability State Index“ beschreibt, wie stabil die Montage eines einzelnen Bauteils ist, während der „Total Stability Index“ die Stabilität der gesamten Baugruppe beschreibt. Bestimmt werden diese Indizes über die verfügbaren Freiheitsgrade nach der Montage. Ermittelt werden die Freiheitsgrade über eine Kollisionsanalyse. Allerdings erfolgt diese nur in Richtung der Koordinatenachsen und sieht sich damit denselben Nachteilen

gegenübergestellt wie die beschriebenen Ansätze aus Kapitel 2.1.2. Damit ist die Analyse der Stabilität aufgrund der fehleranfälligen Kollisionsanalyse auch fehler-behaftet. Weiterhin ist es unzureichend, die vorhandenen Freiheitsgrade unabhängig zu beschreiben, da Freiheitsgrade immer im Bezug zu ihrer Schwerkraftrichtung beschrieben werden sollten. So sollte ein vorhandener Freiheitsgrad gegen die Schwerkraftrichtung deutlich negativer gewichtet werden als ein Freiheitsgrad in Schwerkraftrichtung.

Eine umfassende Analyse von Stabilitätskriterien wurde von Ou et al. (2013) mithilfe der Bestimmung einer Schwerkraftstabilität, Baugruppenstabilität und Bewegungsstabilität erreicht. Die Schwerkraftstabilität knüpft an der Kritik der Methode von Xiaoming et al. (2007) an und bestimmt, ähnlich wie der „Stability State Index“, die Stabilität der Baugruppe bei der Montage. Ergänzend dazu wird noch zwischen translatorischer und rotatorischer Stabilität unterschieden. Abbildung 2.11a veranschaulicht auf der linken Seite die translatorische Stabilität. Die translatorische Stabilität ist dadurch definiert, dass das Bauteil einen direkten Kontakt mit der Arbeitsfläche hat und die Montage in Schwerkraftrichtung erfolgt. Falls dies nicht der Fall ist, ist die Montage instabil. Mithilfe eines Fixierungselements, wie einer Schraube, können Bauteile allerdings auch gegen die Schwerkraftrichtung als schwerkraftstabil angesehen werden (Ou et al. 2013). Die rechte Seite von Abbildung 2.11b beschreibt die rotatorische Stabilität, die den Schwerpunkt der Baugruppe untersucht. Liegt der Schwerpunkt in Schwerkraftrichtung auf der Baugruppe, so ist die Montage stabil.

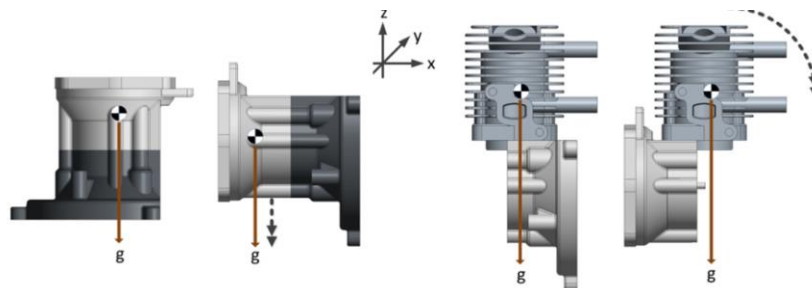


Abbildung 2.11 Unterscheidung der Schwerkraftstabilität: translatorische Stabilität (rechts) und rotatorisch Stabilität (links) (Ou et al. 2013)

Die Baugruppenstabilität wird mithilfe der Schwerkraft und Befestigungskräften der Baugruppe definiert, während die Bewegungsstabilität auf den Bewegungskräften und der Schwerkraft basiert (Ou et al. 2013). Mithilfe eines Ordnungssystems werden anschließend die Montageoperationen bewertet. Selbst Umorientierungen während der Montage können erfasst und reevaluiert werden, allerdings prüft das System hierbei nicht, ob die Baugruppe noch stabil ist. Wirkt die Montagerichtung in Richtung des Kontakts und der Schwerkraft, so ist eine Montageoperation stabil. Die Methode von Ou et al. (2013) ist ein Fortschritt für die Stabilitätsbetrachtung, jedoch liegt der Fokus nicht auf der Montagesequenz. Daher war es bisher nicht möglich, die Erkenntnisse in der Montagesequenzgenerierung zu berücksichtigen.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung von Stabilitätskriterien während der Montage wurde von Bedeoui et al. (2019) veröffentlicht. Die Arbeit baut auf der Methode von Ben Hadj et al. (2015) auf. Ergänzt wurde hier, dass auch das Volumen, die Masse und die Bounding Box jedes einzelnen Bauteils ausgelesen und miteinbezogen werden müssen. Die Bildung der Montagesequenz hängt dabei von der Distanz und dem Moment ab, das zwischen dem Schwerpunkt der bestehenden Baugruppe und dem Schwerpunkt des zu montierenden Bauteils wirkt. Nach jedem montierten Bauteil wird daher der Schwerpunkt der aktuellen Baugruppe neu bestimmt. Diese Stabilitätskriterien sind zwar nicht ausreichend, um optimierte Montagesequenzen zu generieren, doch ist die Besonderheit dieser Methode, dass auch Kräfte zwischen den Bauteilen und der Baugruppe erfasst werden.

Eine regelbasierte Methode zur Bestimmung der Stabilität wurde zudem von Fechter et al. (2019) erprobt. Anders als bei den anderen Methoden mit Stabilitätskriterien, bestimmen jedoch nicht die Stabilitätskriterien die Montagesequenz, sondern diese gelten lediglich als eine Regel für die Bewertung einer Montageoperation. So wird nach jedem gesetzten Bauteil geprüft, ob die Baugruppe fixiert werden kann oder ob noch Bauteile vorher zu setzen sind. Ist die Baugruppe noch nicht stabil, so müssen erst die Bauteile

montiert werden, die eine Fixierung verzögern. Weiterhin wurde auch eine Regel aufgestellt, die es verlangt, immer alle Schrauben einer Fixierung hintereinander zu setzen, bevor neue Bauteile montiert werden dürfen. Die Methode von Fechter et al. (2019) legte damit den Fokus eindeutig auf die Generierung von Montagesequenzen, hatte allerdings auch Schwächen. So konnten keine Unterbaugruppen betrachtet werden und die Methode war nicht in der Lage, größere Baugruppen fehlerfrei zu analysieren.

Neben der Betrachtung der geometrischen Restriktionen können Stabilitätsbetrachtungen schon bei der Konstruktion untersucht werden. So existieren Methoden, wie beispielsweise von Boothroyd et al. (2011), die während der Konstruktion mit Konstruktionsregeln das Design der Baugruppe beeinflussen. Jedoch liegen diese Methoden nicht im Fokus dieser Arbeit, da die 3D-Modelle als gegeben angenommen werden und den Input der Arbeit darstellen.

2.1.4 Optimierte Montagesequenzen

Von Bauteil-Kontakten über geometrische Restriktionen bis hin zur Bauteil- und Baugruppenstabilität wurden schon einige Faktoren untersucht, die als Basis zur Bestimmung der Montagesequenzen dienen. Doch zur Optimierung von Montagesequenzen braucht es auch Optimierungskriterien, die auf diese angewandt werden können. Diese Optimierungskriterien lassen sich nicht auf jeden Ansatz übertragen. Vor allem die Ansätze, die aus den Jahren vor 2011 stammen, weisen Lücken bezüglich der Optimierbarkeit auf. In einem Review-Paper von Abdullah et al. (2019) werteten die Autoren die am häufigsten verwendeten Optimierungskriterien für die Generierung von Montagesequenzen aus. Bei diesen Optimierungskriterien handelte es sich um die Minimierung von Montagerichtungen, Werkzeugwechsel, Montageart, Montagekomplexität, Baugruppenstabilität und Montage- bzw. Werkzeugpfade (Abdullah et al. 2019). In angrenzender Literatur werden zwar weitere Optimierungskriterien, wie die Minimierung der Steckerähnlichkeit oder

Produktionsauslastung, genannt (Abdullah et al. 2019). Allerdings handelt es sich hierbei um Faktoren, die sich nicht in einer gegebenen Baugruppe beeinflussen lassen. Die relevantesten Optimierungskriterien lassen sich in vier Kategorien einteilen. Basierend auf dem Stand der Technik werden im Folgenden die relevanten Optimierungskriterien beschrieben und auf deren Umsetzbarkeit hin untersucht.

2.1.4.1 Minimierung der Montagerichtungen und -pfade

Von Montagerichtungen bzw. Reorientierungen ist die Rede, wenn die Montagerichtung sich nach einer Montageoperation ändern muss, um die nächste Montageoperation auszuführen. Reorientierungen sind immer mit einem Zeitverlust aufgrund erhöhter Anzahl der Montagepfade verbunden und können zu Unzugänglichkeiten an der Baugruppe führen, wenn nicht auch die Baugruppe reorientiert wird (Abdullah et al. 2019). Die Minimierung der Reorientierungen ist besonders bei der Verwendung von Montagewerkzeugen oder Automatisierungslösungen mit Robotern von Bedeutung, da dies zu einer Neuausrichtung des Werkzeugs führt (Pan et al. 2006b). Aufgrund dieser Auswirkungen ist die Reduktion der Anzahl der Reorientierungen in der Vergangenheit das am häufigsten verfolgte Optimierungskriterium (Abdullah et al. 2019).

Schon Pan (2005) beschrieb das Potenzial der Reorientierungen als Optimierungskriterium und untersuchte den Einfluss auf die Montagezeit. Das Ergebnis war ein signifikanter Einfluss der Zahl der Reorientierungen auf die Montagezeit. Besonders bei der automatisierten Montage mit Robotern nahm die Zeit für die Reorientierungen 20-40% der Gesamtmontagezeit ein (Pan 2005; Pan et al. 2006b).

Eine boolesche Methode zur Minimierung der Reorientierungen konnten Choi et al. (2009) vorstellen. So wird bei der Wahl der nachfolgenden Montageoperation immer abgefragt, ob eine Änderung der Montagerichtung notwendig ist. Falls eine Änderung

der Montagerichtung erforderlich ist, wird dem Prozess eine Strafe zugeteilt. Daraufhin senkt der Pfad die Attraktivität und dies führt dazu, dass alternative Montageprozesse eine höhere Eignung aufweisen.

Lu et al. (2016) gehen noch einen Schritt weiter und unterscheiden den Grad der Reorientierungen. So ist eine 90° Reorientierung zwar schlechter bewertet als keine benötigte Reorientierung, allerdings besser bewertet als eine 180° Reorientierung. Somit wird in 90° -Schritten die Optimierungsfunktion für die Reorientierung angepasst. Aus der Methode von Lu et al. (2016) ergeben sich vier mögliche Montagerichtungen, die auf das Koordinatensystem der Baugruppe ausgerichtet sind. Der Nachteil dieses Vorgehens ist, dass Montagerichtungen nur in vier Ebenen des Koordinatensystems der Baugruppe eingeteilt werden und somit auch zu Fehlern in der Zuordnung führen können. Abbildung 2.12 veranschaulicht dies anhand eines abstrakten Beispiels. So würden, nach der Ausführung einer Montageoperation in „Montagerichtung 1“, die Montagerichtungen 2 und 3 gleich bewertet werden, da Änderungen von $0-90^\circ$ gleichwertig betrachtet werden. Allerdings würde die Auswahl von „Montagerichtung 2“ zu deutlich längeren Montagewegen und zu größeren Sprüngen der Reorientierung führen.

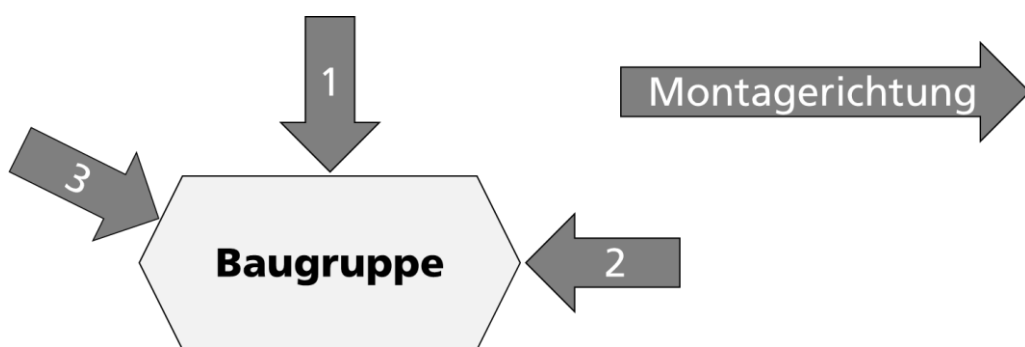


Abbildung 2.12 Vergleich von Montagerichtungswechsel bei einer Reorientierung

Aus diesem Grund ergänzten Neb et al. (2021e) und Göke (2019) diesen Ansatz damit, dass die Montagerichtungen nach ihren jeweiligen Orientierungswinkeln unterschieden werden und nicht mehr in Orientierungsgruppen eingeteilt werden. Weiterhin wurde eine

Unterscheidung der dritten Koordinatenachse aufgenommen, sodass auch Höhenunterschiede einbezogen werden können. Somit wird die Montagerichtung als dreidimensionaler Vektor betrachtet und bestimmt die Reorientierung nun mit Winkeln. Formel 2.2 beschreibt die Bestimmung der Montagerichtungswechsel, wobei ein Orientierungswinkel von $\theta > 10^\circ$ als Reorientierung angesehen wird (Göke 2019).

$$\theta = \arccos\left(\frac{v_A * v_B}{|v_A| * |v_B|}\right) \quad (2.2)$$

2.1.4.2 Anzahl der Werkzeugwechsel und Wechsel der Montageaufgaben

Die Anzahl der Werkzeugwechsel beschreibt die Häufigkeit der Wechsel, für die ein bestimmtes Werkzeug, das für eine Montageoperation genutzt wurde, durch ein anderes Werkzeug für eine weitere Montageoperation ersetzt werden muss. Der Wechsel von Montageaufgaben steht für die Unterscheidung der Montageoperationen. Händische Montageoperationen wie das Stecken werden meist aggregiert betrachtet.

Werkzeugwechsel können über Kostenfunktionen quantifiziert werden, indem beispielsweise die Werkzeugwechselzeit und/oder deren Häufigkeit erhoben wird. Diese sogenannten Werkzeugwechsel ermöglichen es, den Einfluss der Wechsel zu vergleichen und als Optimierungskriterium zu verwenden. Die Besonderheit der Werkzeugwechsel, verglichen mit Reorientierung, ist, dass Werkzeuge für unterschiedliche Montageoperationen auch zeitlich versetzt genutzt werden können. Damit scheint es auf den ersten Blick vorteilhaft, alle Montageoperationen eines Typs mit dem passenden Werkzeug durchzuführen, bevor das Werkzeug gewechselt wird, um andere Montageoperationen eines anderen Typs auszuführen. Allerdings führt dieses Vorgehen zu einer erhöhten Anzahl an Reorientierungen. Zu guter Letzt können Werkzeugwechsel des gleichen Typs nicht immer vermieden werden, wenn Montageoperationen eines anderen Typs diesen Operationen als geometrische Restriktion im Weg stehen.

Neben dem Einfluss der Reorientierungen untersuchten Lu et al. (2016) auch Werkzeugwechselkosten in Form der Werkzeugwechselzeiten in Abhängigkeit des Montagearbeitsplatzes und der Montageoperation. Angelehnt ist die Methode hierbei an die Methode von Tseng (2006) zur Unterscheidung von Montagewerkzeugen. Tseng (2006) unterteilt Montageoperationen in vier Levels, die von manuellen Tätigkeiten bis hin zu destruktiven Prozessen wie Sägen und Hämmern reichen. Als Unterscheidungskriterium wird hierbei allerdings nicht das Werkzeug selbst spezifiziert, sondern die aufzubringende Kraft. Zur Optimierung wird daher geprüft, ob die Montageoperationen demselben Level zugeordnet werden können (Tseng 2006; Tseng et al. 2008; Lu et al. 2016). Die Werkzeugwechsel sind damit lediglich an der Kraft der Montageoperationen orientiert und nicht am Werkzeug selbst. Somit werden Schraubprozesse mit unterschiedlichen Schlüsselweiten demselben Level zugeordnet und identifizieren keinen Werkzeugwechsel, auch wenn in der Realität ein Werkzeugwechsel aufgrund unterschiedlicher Schlüsselweiten erforderlich wäre.

Eine erwähnenswerte Methode aus einem angrenzenden Forschungsbereich wurde von Bengel (2009) veröffentlicht. Ziel ist es, aus den Geometrien einer Baugruppe Montageoperationen zu spezifizieren und Ressourcen zuzuordnen. Modelliert wurde die Baugruppe mithilfe von Attributen in einer Ontologie. Bei der Übereinstimmung dieser Attribute und deren Werkzeuge bzw. Ressourcen können schließlich Montageoperationen aus einer Datenbank zugeordnet werden. Pfrommer et al. (2013) nahmen sich einer vergleichbaren Herausforderung an und modellierten die Ressourcen über Skills. Diese Skills sind in der Lage, Prozesse durchzuführen, die den Baugruppen zugeordnet sind. Anders als die Methode von Tseng (Tseng 2006; Tseng et al. 2008; Lu et al. 2016) sind Bengel (2009) und Pfrommer et al. (2013) in der Lage, das tatsächliche montagerelevante Werkzeug einer Montageoperation zuzuordnen. Als Nachteil ist an dieser Stelle zu nennen, dass dieses Vorgehen manuelle Schritte beinhaltet und bisher nur für kleinere Baugruppen realisierbar ist.

Weitere Möglichkeiten, um aus Bauteilgeometrien das benötigte Montagewerkzeug zu identifizieren, wurden vom Autor dieser Arbeit veröffentlicht (Neb et al. 2020a; Neb et al. 2020b; Briki 2019b) und werden daher nur kurz zusammengefasst. So wurde zur Bestimmung von Fixierungselementen, wie Schrauben oder axialen Sicherungsringen, eine KI entwickelt, die Voxel-Modelle von Bauteilen klassifiziert und damit Normteile identifiziert (Abbildung 2.9). Der Fokus dieser Methode liegt auf der Bestimmung genormter Fixierungselemente, jedoch ist die Methode auch in der Lage, den Normteilen das passende Montagewerkzeug aus einer Datenbank zuzuordnen (Briki 2019b; Neb et al. 2020a; Neb et al. 2020b). Die Methode kann mit einer Genauigkeit von 98,5% die eintrainierten Normteile erkennen und damit einem Werkzeug zuordnen. Weiterhin ist erheblich, dass der Klassifikator zwar die Bauteile der korrekten Norm zuteilt, die genauen Details der Normteile werden jedoch aus dem CAD-System extrahiert. Alle Bauteile, die nicht als Normteil klassifiziert werden, werden als Handmontage gewertet. Diese Werkzeugzuordnung kann dazu genutzt werden, Werkzeugwechselkosten zu bestimmen und in der Montagesequenz zu reduzieren.

2.1.4.3 Montagekomplexität

Die Komplexität der Montage stellt einen Optimierungsfaktor dar, der nicht darauf ausgelegt ist, die Montagesequenzen effizienter zu gestalten. Dieser Optimierungsfaktor zielt darauf ab, Montagefehler zu verhindern und die tatsächliche Montierbarkeit von Baugruppen mithilfe eines „Fitting Index“ zu untersuchen. Angelehnt ist dieses Kriterium an eine Schwerkraftbetrachtung, da Montageoperationen in Schwerkraftrichtung als weniger komplex angesehen werden als Montageoperationen gegen die Schwerkraftrichtung. Untersuchungen zur Schwerkraftbetrachtung wurden schon in Kapitel 2.1.3 vorgestellt und können daher genutzt werden, um die Montagekomplexität einer Montagesequenz zu optimieren.

Zudem gibt es erste Ansätze zur Integration von Ressourcen und Erreichbarkeiten, wie von Li et al. (2009). Jedoch sind viele dieser Ansätze vielmehr theoretische Konzepte als echte Optimierungskriterien und nicht auf 3D-Modelle anwendbar.

2.1.4.4 Baugruppenstabilität

Die Stabilität einer Baugruppe wurde bereits in Kapitel 2.1.3 als Kriterium für die Generierung von Montagesequenzen untersucht. Die Bestimmung der Stabilitätskriterien hatte allerdings den Fokus, Montagerestriktionen zu definieren, um schon im Vorfeld montagestabile Montagesequenzen zu generieren. Jedoch kann eine stabile Baugruppe auch als Faktor zur Generierung einer Optimierung von Montagesequenzen genutzt werden.

Weiterhin gehört auch die Betrachtung der Unterbaugruppen zu diesem Optimierungskriterium, da gerade aufwendigere Baugruppen sonst nicht montiert werden könnten. Doch auch diese werden nahezu ausschließlich über Montagerestriktionen, wie in Kapitel 2.1.3 vorgestellt, bestimmt. Es gibt nur einige wenige Ansätze, die diese Informationen über mathematische Algorithmen, wie Kou et al. (2020) sie in Matlab programmierten, herleiten. Jedoch führt diese Entkopplung des 3D-Modells zu manuellen Arbeitsschritten und damit zu einer aufwendigen Umsetzung.

2.1.5 Fazit zur Generierung von Montagesequenzen

In dem vorliegenden Kapitel wurden Ansätze zur Montagesequenzgenerierung vorgestellt. Hierbei konnten über die vergangenen Jahrzehnte unterschiedlichste Ansätze erarbeitet werden. Jedoch wird ersichtlich, dass es sich bei diesen Ansätzen meist um Einzellösungen handelt, die in der Regel eine manuelle Vor- oder Nacharbeit benötigen.

Dennoch liefern diese Vorarbeiten wichtige Erkenntnisse zur präventiven Auslese von Montagesequenzen (Abbildung 2.13). So zeigte sich, dass über Kontaktkriterien und geometrische Restriktionen unmögliche Montagesequenzen schon im Vorfeld gefiltert werden können. Weiterhin kann über die Analyse der Bauteilbeziehungen oder einer Kollisionsprüfung die Montagestabilität bewertet werden und instabile Montagesequenzen ausschließen. Durch diese Reduktion des Suchraums ist es in den nachfolgenden Untersuchungen deutlich realistischer zu validen Ergebnisse zu gelangen.

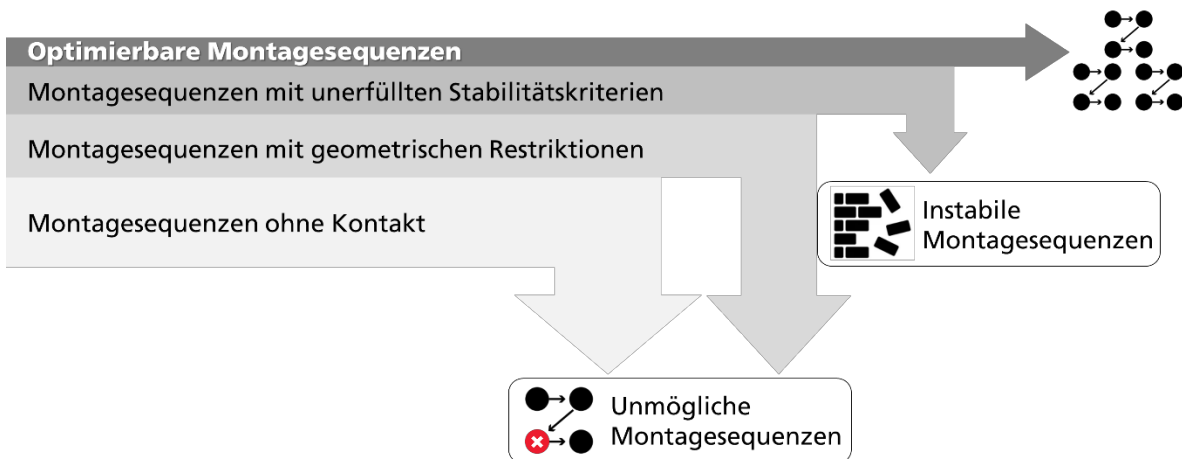


Abbildung 2.13 Ansätze zur Generierung optimierbarer Montagesequenzen

Für den verbleibenden Lösungsraum konnten zudem erste Optimierungskriterien zur Identifikation von optimierten Montagesequenzen erarbeitet werden. Als Optimierungskriterien wurden hierbei die Minimierung von Montagerichtungen bzw. Pfade, Werkzeugwechsel, Aufgabenwechsel und die Reduktion der Montagekomplexität und Erhöhung Baugruppenstabilität identifiziert. Im Rahmen dieser Arbeit sollen diese etablierten Kriterien beachtet und um weitere Optimierungskriterien erweitert werden.

In einem nachfolgenden Schritt muss nun untersucht werden, wie einzelne Montagesequenzen aus einem einheitlichen Lösungsraum ermittelt werden können. Hierfür werden im Folgekapitel unterschiedliche Ansätze untersucht.

2.2 Ableitung der Montagesequenzen

Nachdem die Optimierungskriterien beleuchtet wurden, bedarf es der Ermittlung eines Verfahrens zur Ableitung der Montagesequenzen. Die Ableitung der Montagesequenzen ist ein zeitintensiver und komplexer Vorgang, der selbst von Experten, aufgrund des großen Lösungsraums, nicht überblickt werden kann. So ist es trotz der größeren Zeitaufwände für die Planer/-innen kaum möglich, die bestmögliche Montagesequenz aus der Summe der Lösungen zu identifizieren (Bahubalendruni et al. 2016a). Dies liegt vor allem daran, dass die ideale Montagesequenz stark vom Aufbau der Baugruppe und den Erfahrungen bzw. Präferenzen der Planer/-innen abhängt. Damit eine objektiv optimale Montagesequenz auf Basis der Optimierungskriterien gefunden werden kann, sollen nun Vorarbeiten untersucht werden. Im Folgenden werden die relevanten Ansätze vorgestellt.

2.2.1 Graphenbasierte Ansätze

Die ersten Ansätze zur Ableitung der Montagesequenzen befassten sich noch mit der Untersuchung sämtlicher Montagesequenzen (Lieberman et al. 1977; Fazio et al. 1987; Bourjault 1988). Spätere, darauf aufbauende Ansätze nutzten schließlich Heuristiken, um die Komplexität der Lösungsfindung zu reduzieren. Mithilfe dieser heuristischen Ansätze können in kürzeren Zeiten gute, wenn auch nicht zwingend optimale, Lösungen gefunden werden. Die ersten dieser Ansätze waren die graphenbasierten Ansätze. Hier werden die montagerelevanten Beziehungen zwischen den Bauteilen in Form von Knoten und Kanten graphisch visualisiert. Mithilfe von gewichteten und gerichteten Kanten können so Präferenzen in den Graphen eingebracht werden.

Ein gängiger Ansatz ist der Montagevorranggraph, bei dem der Montagefortschritt über Zustandsübergänge dargestellt wird. Ein Nachteil des Montagevorranggraphen ist, dass die Verknüpfungen lediglich UND-Beziehungen aufweisen und dieser sich daher zunehmend zu einer Darstellungsform einzelner Montagesequenzen entwickelte (Galaske

2019). Eine Erweiterung dazu stellt der weit verbreitete AND/OR-Graph von Homem de Mello et al. (1990) dar. Abbildung 2.14 veranschaulicht einen solchen AND/OR-Graphen einer dreiteiligen Baugruppe. Die Besonderheit ist, dass alle AND/OR-Beziehungen der gesamten Baugruppe visualisiert werden und alle Montageschritte damit auch als umgekehrte Demontageschritte angesehen werden können. Weiterhin können so Unterbaugruppen und damit auch alle möglichen Zwischenstände der Montage abgebildet werden (Homem de Mello et al. 1990). Ein Nachteil dieses Ansatzes ist einerseits die aufwendige Erstellung der Graphen und andererseits die wachsende Unübersichtlichkeit mit jedem zusätzlichen Bauteil. Wie Abbildung 2.14 veranschaulicht, sind selbst kleine Baugruppen nur schwer zu überschauen und auch die Chance auf die Identifikation einer optimalen Montagesequenz nimmt mit der Größe ab.

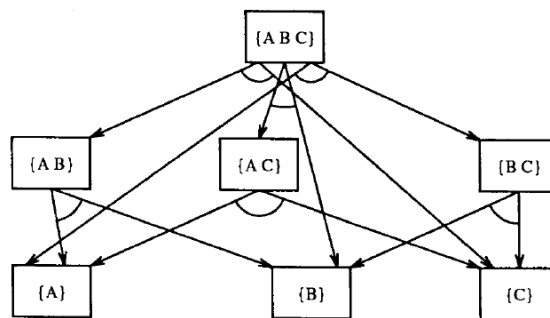


Abbildung 2.14 AND/OR Graph einer dreiteiligen Baugruppe (Homem de Mello et al. 1990)

Eine Lösung des Problems der Unübersichtlichkeit stellten Thomas et al. (2003) bereit, indem die Graphen automatisiert ausgelesen werden. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, wurden die Graphen mit diversen manuellen Arbeitsschritten generiert. 2015 wurde dieser Ansatz nochmals erweitert, indem zusätzlich noch ein Kraft- und ein Hierarchie-Graph generiert wurden, um die Stabilität gezielter zu analysieren (Thomas et al. 2015). Zur Auswertung der AND/OR-Graphen nutzen Thomas et al. (2015) und Marinescu et al. (2009) einen Branch-and-Bound-Algorithmus, der den Lösungsbaum mit jedem Schritt erweitert. Nachteil dieser Umsetzung ist, dass der generelle Ansatz kaum in der Lage ist, unmögliche Montagesequenzen im Vorfeld zu filtern und damit gezwungen ist, fast alle Montagesequenzen zu analysieren. Dies führt letztendlich zu erhöhten Rechenzeiten und

damit zu Restriktionen bei der Analyse größerer Baugruppen. Aus den Publikationen der letzten Jahrzehnte wird ersichtlich, dass Thomas et al. (2015) durch eine kontinuierliche Verbesserung ihres Systems den fortschrittlichsten Ansatz zur Erzeugung und Auswertung von AND/OR-Graphen entwickelten (Thomas et al. 2003; Thomas et al. 2010; Thomas et al. 2015). Jedoch konnte nie das Kernproblem ihres Ansatzes gelöst werden: die automatische Erstellung der AND/OR-Graphen.

2.2.2 Genetischer Algorithmus

Die Idee für den Genetischen Algorithmus (GA) wurde durch die Evolution natürlicher Lebensformen inspiriert, reiht sich in die Klasse der evolutionären Algorithmen ein und ist damit der Künstlichen Intelligenz (KI) zuzuordnen. Der GA stellt damit einen Optimierungsalgorithmus dar, mit dem Ziel, sukzessiv immer die besten „Gene“ an die nachfolgende Generation weiterzugeben. Ausgangspunkt ist fortwährend eine zufällig generierte Startpopulation. Hierbei wird jede Population nach ihrer Fitness in Bezug auf vordefinierte Optimierungskriterien bewertet. Dabei besitzen in einer Population alle Individuen ein Chromosom, das die dafür relevanten „Geninformationen“ enthält. Auf diese Weise kann der Algorithmus die überlegensten Individuen einer Generation als Eltern bestimmen und kombiniert an die nachfolgende Generation weitergeben. Um den Lösungsraum nicht schon im Vorfeld einzuschränken, werden einige Individuen zudem „mutiert“, damit auch zufällige Änderungen betrachtet werden können (Kongar et al. 2006). Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis ein vorbestimmtes Zielkriterium oder Abbruchkriterium erreicht ist. Die Vorteile des GA sind die schnelle Generierung der Lösungen und deren unkomplizierte Implementierung. Die größte Schwachstelle des GA ist die Neigung, bei lokalen Minima oder Maxima hängen zu bleiben und damit nicht zwingend globale Lösungen zu identifizieren (Smith et al. 2002).

Choi et al. (2009) erweiterten die bestehenden Ansätze schließlich um die Optimierungskriterien Montagezeit und Reorientierungen, wobei das

Optimierungskriterium Montagezeit im Grunde von den Reorientierungen abhängt und als eigenständiges Kriterium angesehen wird, aufgrund der Tatsache, dass immer alle Bauteile montiert werden müssen. Somit ist diese Herangehensweise eher ungeeignet. Nichtsdestotrotz bietet dieser Ansatz Neuerungen zu den vorhergehenden Ansätzen. So wird zur Einhaltung der Präzedenzen ein sogenanntes „Precedence Preservative Crossover“ genutzt, um einen weiteren Zufallsfaktor einzubringen und gleichzeitig gezielter nach besseren Montagesequenzen gegenüber suchen (Choi et al. 2009). Ausgangspunkt ist dabei eine zufällig generierte Population und die Bestimmung der Ausführbarkeit. Für jedes Chromosom wird schließlich eine Fitness über Funktionen bestimmt und die besten davon werden weitergegeben. Schließlich wird durch die Schritte „Crossover“ und „Mutation“ eine neue Generation erstellt. Das Ganze wird so lange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium in Form eines Fitnesswertes oder der Anzahl der maximalen Generationen erreicht wird. Ein großer Nachteil ist, dass die Merkmalsausprägungen der Optimierungskriterien als gegeben angenommen werden müssen, um als Matrizen manuell in das System übertragen zu werden. Schon die manuelle Erhebung der Reorientierungen sämtlicher Montageszenarien ist aufgrund der vielen Beziehungen zwischen den Bauteilen enorm aufwendig und fehleranfällig. Doch gerade die manuelle Erfassung der Montagezeiten weist eine sehr starke Abhängigkeit von Faktoren wie der Baugruppe, dem Montagestand oder der personellen Erfahrung auf. Damit sind diese Faktoren eher subjektiv und sehr komplex bzw. zeitaufwendig für unterschiedliche Baugruppen zu erheben. So ist dieser Ansatz für die Herausforderung einer automatisierten Ableitung von Montagesequenzen leider ungeeignet. Auch neueste Veröffentlichungen zu diesem Ansatz, wie von Tian et al. (2019) oder Zhao et al. (2018), zeigten, dass nur sehr wenige Verbesserungen realisiert werden können.

2.2.3 Reinforcement Learning

Ein weiterer KI-basierter Ansatz, der schon für die Ableitung von Montagesequenzen genutzt wurde, ist das Reinforcement Learning (RL) bzw. Deep Reinforcement Learning

(DRL). Aufgrund der Tatsache, dass die Montagesequenzgenerierung als ein sequenzielles Entscheidungsproblem formuliert werden kann, können Agenten eingesetzt werden. Diese Agenten haben die Aufgabe, Aktionen in einer Umgebung durchzuführen und ihre kumulativen Belohnungen zu maximieren (Hu et al. 2020). Hierzu muss durch wiederholende Versuche ein Gleichgewicht zwischen dem bereits Erlernten und dem Neuen eingehalten werden, um bestmögliche Resultate zu erzielen. Dieses Vorgehen hat sich besonders in den letzten Jahren bei komplexen Problemen, die aufgrund ihrer Komplexität nicht modelliert werden konnten, bewährt (Zhao et al. 2019).

Zhao et al. (2019) stellten einen ersten Ansatz vor. Ihr sogenanntes Assembly Sequence Planning System for Workpieces Deep Reinforcement Learning (ASPW-DRL) wurde dazu genutzt, automatisiert Montagesequenzen kleinerer Baugruppen zu bestimmen. Zwar konnte der Ansatz schon erste Probleme beheben und eine Version der Trainingsumgebung entwickeln, scheiterte jedoch an den Belohnungsfunktionen und der unzureichenden Einbindung der Optimierungskriterien. Zudem gab es noch Probleme mit falsch zusammengesetzten Bauteilen und einige Herausforderungen bei der Trainingsumgebung (Zhao et al. 2019).

Der neueste Ansatz in diesem Segment wurde von Zhang et al. (2021) vorgestellt. Hierbei wurden zusätzliche Einschränkungen der Montageoperationen integriert, um den Fokus besser auf optimierte Montagesequenzen zu legen. Weiterhin wurde die These aufgestellt, dass eine maximale Belohnung zu einer optimalen Montagesequenz führen muss (Zhang et al. 2021). Vertieft wurde diese These allerdings nicht. Für die Umsetzung wurde ein quantitativer Ansatz gewählt, der lediglich anhand der Montagezeit gemessen wird. Zwar haben Optimierungskriterien, wie Reorientierungen oder Montagepfade, einen direkten Einfluss auf die Montagezeit, jedoch ist bei der Suche der optimierten Montagesequenz den Agenten nie bekannt, welche Faktoren die Montagezeit wirklich beeinflussen. Weitere Einschränkungen des Ansatzes sind die fehlende Unterscheidung der einzelnen Montageoperationen und der fehlende Einbezug des Montagewerkzeugs.

Der Ansatz müsste für die Integration dieser Optimierungskriterien jedoch um weitere messbare Kriterien ergänzt werden.

2.2.4 Traveling Salesperson Problem

Das Traveling Salesperson Problem (TSP) ist ein bekanntes Optimierungsproblem. Das TSP hat zum Ziel, aus einer vorgegebenen Menge an Orten den kürzesten Weg zu allen Orten zu finden und schließlich wieder zurück zum Ausgangsort zurückzukehren. Hierbei sollen Optimierungskriterien, wie die Distanzen zwischen den Orten oder auch die Kosten für die Strecke, minimiert werden. Das Ergebnis ist schließlich die beste Besuchsreihenfolge. Bis heute gibt es allerdings noch keine Lösung, welche dieses Problem in einer polynomiellen Zeit lösen kann, auch wenn schon sehr gute Heuristiken dazu existieren. In der Vergangenheit konnten zahlreiche Heuristiken und Algorithmen, wie „nearest neighbor“, „nearest insertion“, „cheapest insertion“, „greedy algorithm“ oder „fastest insert“, dazu erprobt werden (Rosenkrantz et al. 1977; Hassin et al. 2008).

Weiterhin können viele der in diesem Kapitel behandelten Such- und Optimierungsansätze als TSP modelliert und untersucht werden. Besonders die graphenbasierten Ansätze und GA bieten sich hierfür an (Rashid et al. 2012). Ansätze können auch kombiniert werden, wie es schon Baranowski et al. (2014) vornahmen, indem sie das TSP mit einem Ant Colony Algorithm kombinierten und daraus ein modifiziertes TSP erstellten. Das TSP etablierte sich besonders als Modellierungsform in der Logistik, Tourenplanung und im Produktdesign bei der Chip-Herstellung.

2.2.5 Fazit zur Ableitung von Montagesequenzen

Weitere vereinzelt genutzte Ansätze zur Ableitung von Montagesequenzen finden sich zusätzlich im Anhang 9.1. Zusammenfassend wird ersichtlich, dass viele und grundlegend

unterschiedliche Ansätze zur Ableitung von Montagesequenzen existieren. Jedoch konnte keiner von ihnen bisher die Herausforderungen der automatischen Generierung von Montagesequenzen auf Basis der Optimierungskriterien meistern.

Tabelle 2.1 veranschaulicht hierbei Problematik. So wird ersichtlich, dass bisher kein Ansatz in der Lage ist, Montagesequenzen automatisch abzuleiten. Das liegt bei den graphenbasierten und ergänzenden Ansätzen vor allem an der unausweichlichen Vorarbeit und bei GA, RL und TSP an den sehr spezifischen Parameter für die Auswertung. Der zweite Schwerpunkt ist die Integration der Optimierungskriterien. So bieten lediglich RL und TSP die Möglichkeit der parallelen Integration sehr unterschiedlicher Kriterien. Zwar gibt es bis heute noch keine bekannte Arbeit dazu, allerdings suggerieren die vorgestellten Untersuchungen ein hohes Potenzial. Bei den baugruppenübergreifenden Lösungsverfahren sind, aufgrund der allgemeinen Anwendbarkeit, die graphenbasierten Ansätze und das TSP hervorzuheben. RL-Ansätze scheitern an dem aufwendigen Trainingsverfahren, der Abhängigkeit der trainierten Baugruppen und der Montagekomplexität realer Baugruppen mit nicht-standardisierten Geometrien.

Tabelle 2.1 Vergleich der untersuchten Lösungsansätze zur Ableitung von Montagesequenzen

	Graphenbasierte Ansätze	Genetischer Algorithmus (GA)	Reinforcement Learning (RL)	Traveling Salesperson Problem (TSP)	Ergänzende Ansätze (Kapitel 9.1)
Möglichkeit der automatischen Auswertung					
Integration der Optimierungskriterien					
Baugruppenübergreifendes Lösungsverfahren					

Zusammengefasst stellt sich die Modellierung als Wegfindungsproblem, wie dem TSP, als besonders geeignet heraus baugruppenunabhängig unterschiedliche Optimierungskriterien automatisiert auszuwerten. Besonders die Aspekte der nachvollziehbaren Modellierung, der Kombination mit intelligenten Algorithmen und der einfachen Integration zusätzlicher Montagerestriktionen sprechen zudem für dieses Vorgehen.

Nichtsdestotrotz weisen die meisten der vorgestellten Ansätze manuelle Arbeitsschritte beim Einlesen montagerelevanter Informationen auf. Ein Großteil der vorgestellten Ansätze füllte Matrizen manuell mit den benötigten Informationen, um diese im Anschluss automatisiert auszulesen. Die Erstellung dieser Matrizen ist hierbei, gerade bei großen Baugruppen, extrem schwer bis kaum möglich. Im nachfolgenden Kapitel 2.3 werden die möglichen Schnittstellen zu den 3D-Modellen untersucht und damit auch die montagerelevanten Informationen, die daraus extrahiert werden können. Basierend auf diesen Untersuchungen wird geprüft, ob die geforderten Informationen der untersuchten Ansätze mit den extrahierten Informationen kompatibel sind. Auf Basis dieser Informationen werden schließlich Folgerungen für einen Lösungsansatz herausgearbeitet.

2.3 Montageplanung mit Schnittstellen zu 3D-Modellen

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methodik zu entwickeln, die es ermöglicht, Montagesequenzen automatisiert aus einem 3D-Modell zu generieren. Nachdem die Ansätze zur Bewertung und Ableitung der Montagesequenzen identifiziert wurden, muss geprüft werden, wie die dazu benötigten Informationen aus den 3D-Modellen extrahiert werden können. Mit den extrahierten Informationen soll im Anschluss geprüft werden, welche Ansätze realistisch sind und wie diese mit den zusätzlich identifizierten Optimierungskriterien angereichert werden können. Eine manuelle Eingabe zusätzlicher Informationen in das Lösungssystem ist in diesem Zusammenhang keine Option.

2.3.1 Interne und externe Ansätze

Ausgangspunkt der Untersuchung ist das 3D-Modell des Konstruktionsprozesses. Die Konstruktion und Modellierung dieser Modelle erfordert sehr viel Zeit und Fachwissen. Daher sind diese Modelle auch angereichert mit montagerelevanten Informationen, wie geometrischen Beschreibungen, Montagebeziehungen oder Bauteileigenschaften. Für den Zugriff auf 3D-Modelle gibt es interne schnittstellenbasierte und externe dateienbasierte Ansätze (Miao et al. 2002). Zwar beschreiben Hasan et al. (2017a), noch einen dritten ontologischen Ansatz, jedoch entspricht dies nicht der Anwendungslogik. So greifen die internen und externen Ansätze auf die 3D-Modelle zu, der ontologische Ansatz jedoch modelliert diese Informationen lediglich. Zur Anwendung des ontologischen Ansatzes von Hasan et al. (2017a) braucht es somit selbst einen internen oder externen Zwischenschritt, um die Informationen zu extrahieren (Neb 2019). Abbildung 2.15 veranschaulicht die unterschiedlichen Ansätze und Wege, um auf die Informationen in 3D-Modellen zuzugreifen, welche im Folgenden beleuchtet werden.

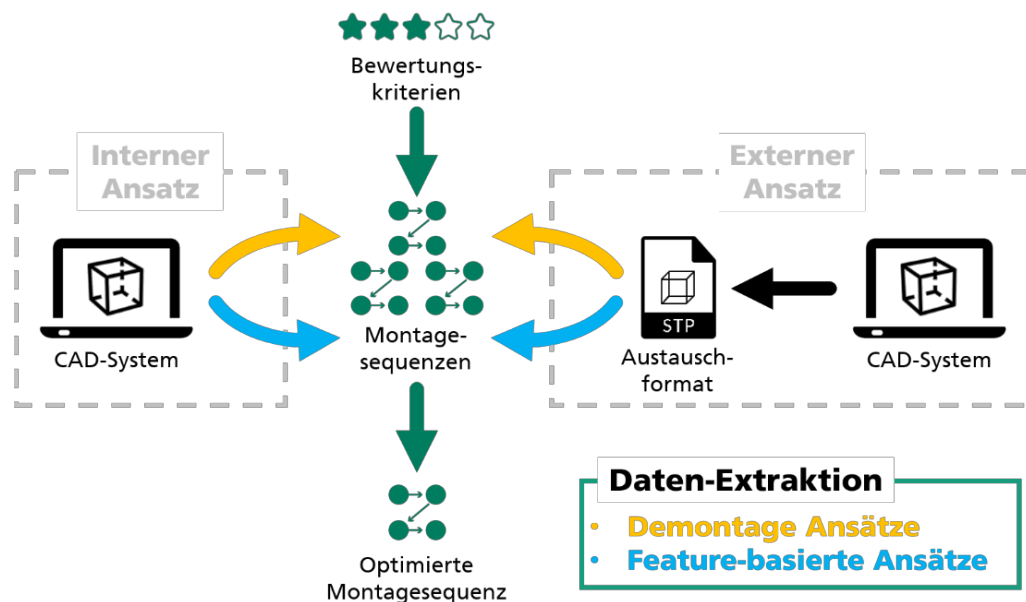


Abbildung 2.15 Unterschiedliche Möglichkeiten für den Zugriff auf die Informationen in 3D-Modellen

2.3.1.1 Interne Ansätze

An erster Stelle sind hierbei die internen Ansätze zu nennen (linker Kasten in Abbildung 2.15). Interne Ansätze greifen direkt auf die Quelle der Entstehung der 3D-Modelle und damit direkt auf die CAD-Systeme zu (Miao et al. 2002). Dazu wird über des Application Programmable Interface (API) ein direkter Zugriff auf die CAD-Systeme vorgenommen. Durch diesen internen Zugriff können Modellinformationen direkt am Entstehungsort ohne Konvertierungsverluste abgegriffen werden. Damit bietet diese Zugriffsmöglichkeit auf die 3D-Modelle auch die höchste Informationsdichte. Ein Nachteil der internen Ansätze ist jedoch, dass die Zugriffsmöglichkeiten sehr systemspezifisch sind und damit eine Abhängigkeit vom CAD-System aufweisen (Neb 2019). So entwickelten schon Autoren Ansätze für den Zugriff auf SolidWorks (Hasan et al. 2016b), CATIA (Zou et al. 2011) oder PTC Creo (Kahl et al. 2016). Jedoch ist es nicht möglich, denselben API-Compiler für unterschiedliche CAD-Systeme zu nutzen.

2.3.1.2 Externe Ansätze

Anders als die internen Ansätze sind externe Ansätze systemunabhängig, da diese auf dateibasierten Verfahren beruhen (Miao et al. 2002; Neb 2019). Grundsätzlich werden hierzu neutrale Datenformate verwendet, wie IGES, XML oder STEP (Hasan et al. 2016a). Diese Standardformate werden von gängigen CAD-Systemen unterstützt und können demnach von ihnen exportiert und importiert werden (Neb 2019). Der große Nachteil externer Ansätze ist allerdings die Tatsache, dass die Informationen aus den nativen Datenformaten der CAD-Systeme extrahiert werden müssen und damit immer mit Konvertierungsverlusten zu rechnen ist (Miao et al. 2002; Hasan et al. 2016a; Neb 2019). Der rechte Kasten in Abbildung 2.15 veranschaulicht den zusätzlichen Prozessschritt. So gehen gerade Informationen zu den Montagebeziehungen und Bauteilinformationen in der Konvertierung verloren (Neb 2019).

2.3.1.3 Datenextraktion

Neben der Unterscheidung zwischen internen und externen Ansätzen müssen auch die verschiedenen Möglichkeiten der Datenextraktion unterschieden werden. So wurde, wie in Kapitel 2.1 und 2.2 beschrieben, in der Vergangenheit häufig das manuelle Erstellen von Matrizen aus externen Quellen genutzt. Demnach ist das Ziel dieser Ausarbeitung die Entwicklung eines automatisierbaren Ansatzes zur Generierung von Montagesequenzen, daher werden nur automatisierbare Schnittstellen betrachtet.

Auf Basis dieser Anforderung bieten sich schließlich nur die demontage- und featurebasierten Datenextraktionen an. Abbildung 2.15 veranschaulicht hierbei, dass diese beiden automatisierbaren Möglichkeiten aus internen und externen Ansätzen realisiert werden können. In den folgenden Kapiteln 2.3.2 und 2.3.3 werden diese Datenextraktionsmöglichkeiten genauer behandelt und auf ihre Eignung für eine automatisierte Generierung von Montagesequenzen geprüft.

2.3.2 Datenextraktion mit Demontageansätzen

Bei den Demontageansätzen wird der Grundsatz „assembly-by-disassembly“ verfolgt. Dieses Vorgehen sieht vor, dass die selbige Sequenz, die zur Demontage einer Baugruppe führt, umgekehrt als Montagesequenz genutzt werden kann (Baldwin et al. 1991). Zusammengefasst, bedeutet dies, dass wenn sich eine Baugruppe demontieren lässt, sie auf die umgekehrte Weise auch wieder montiert werden kann. Dies kann durch unterschiedliche Formen einer Kollisionsanalyse realisiert werden. Der Grundgedanke der Kollisionsanalyse ist es, durch Bewegungen der einzelnen Bauteile in unterschiedliche Koordinatenrichtungen die Kollisionen als Montagebeziehungen zu erfassen. Zudem können so auch die Freiheitsgrade der einzelnen Bauteile bestimmt werden, um geometrische Restriktionen abzuleiten. Abbildung 2.16 veranschaulicht dieses Vorgehen. So wird eine Baugruppe eingelesen und in die relevanten Richtungen der

Koordinatenachsen bewegt, wobei die Art der Bewegung vom Vorgehen und von der Analyselogik abhängt. Im Anschluss an dieses Vorgehen wird ein Graph generiert und schließlich mithilfe eines Suchalgorithmus analysiert. Die verbreitetste Modellierungsmethode ist hierbei der AND/OR-Graph, wie auch in Abbildung 2.16 dargestellt.

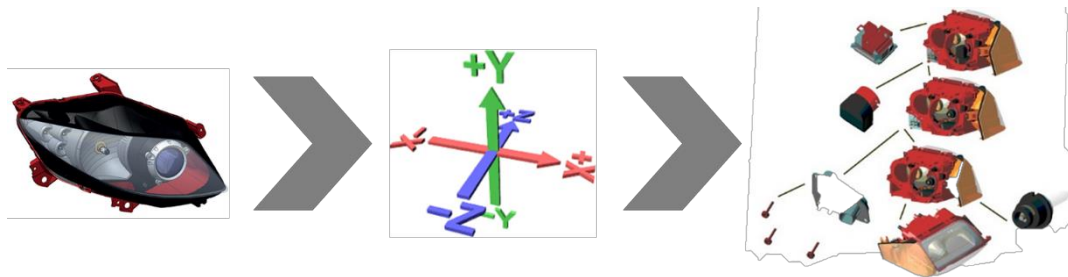


Abbildung 2.16 Kollisionsanalyse eines 3D-Modells in eigener Darstellung mit Abbildungen von Thomas et al. (2003)

Wie Abbildung 2.15 visualisiert, kann diese Analyse über interne und externe Ansätze realisiert werden. So bieten die internen Ansätze die Möglichkeit, eine schrittweise Kollisionsprüfung direkt im CAD-System durchzuführen, wie Alfadhani et al. (2019) es schon anhand eines einfachen Beispiels mit drei Bauteilen untersuchten. Jedoch führt dieses Vorgehen zu sehr hohen Rechenzeiten, da die nativen 3D-Modelle in den CAD-Systemen sehr komplex sind und damit einen erhöhten graphischen Aufwand bei der Umsetzung erfordern. Alternativ kann dieses Vorgehen mithilfe von reduzierten externen Datenformaten realisiert werden. Der Vorteil liegt hierbei darin, dass diese Datenextraktion auch mit reduzierten Dateien wie Mesh-Modellen einer STL-Datei umgesetzt werden kann. Dadurch führen diese reduzierten 3D-Modelle bei einer Kollisionsprüfung zu deutlich geringeren Rechenzeiten. Als Nachteil dieses Vorgehens sind allerdings die Konvertierungsverluste, in Form von Bauteilinformationen oder sonstigen Merkmalsausprägungen, zu nennen.

Wie schon der Stand der Technik in Kapitel 2.1.2 zeigte, wird diese Art der Datenextraktion überwiegend genutzt, um geometrische Restriktionen zu extrahieren. Doch genau dies zeigt die Grenzen dieser Art der Datenextraktion auf. So können die

Kontakte zwischen den Bauteilen erkannt werden, jedoch können diese Kontakte nicht weiter aufgeschlüsselt werden. Damit kann nicht bestimmt werden, ob es sich um eine planare, konzentrische oder tangentielle Beziehung zwischen den Bauteilen handelt. Weiterhin können auch viele Bauteile, wie Schrauben oder Sicherungsringe, nicht kollisionsfrei aus einem 3D-Modell demontiert werden (siehe Abbildung 2.7 und 2.8).

Ein fortschrittlicher Ansatz zur Extraktion montagerelevanter Informationen mit einem Demontageansatz wurde in den letzten Jahren von Kardos veröffentlicht (Kardos et al. 2017; Kardos et al. 2018a, 2018b; Kardos et al. 2020). Durch eine durchdachte geometrische Analyse können auch komplexere Demontagebewegungen identifiziert werden. Wie in Abbildung 2.17 dargestellt, hilft sich der Autor mit einer Vielzahl an manuell ermittelten Einflussgrößen (Kardos et al. 2020). Damit ist es zwar möglich, Fixierungen, Werkzeuge und Montagebeziehungen zu betrachten, jedoch nur, wenn diese vorab manuell ermittelt wurden.

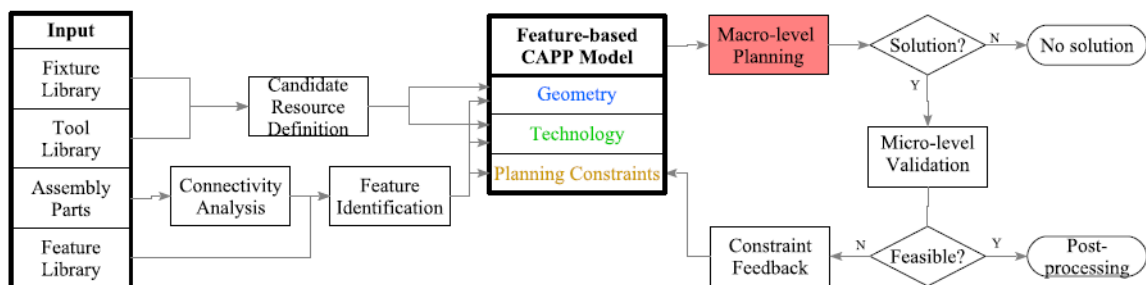


Abbildung 2.17 Entwickelter Workflow von Kardos et al. (2020)

Als fortschrittlichsten Ansatz müssen die Arbeiten von Thomas und ihrem Team genannt werden (Thomas et al. 2003; Maaß et al. 2008; Thomas et al. 2010; Thomas et al. 2015; Andre et al. 2017; Costa et al. 2018; Ebinger et al. 2018). Das an der Technischen Universität Braunschweig und Technischen Universität Chemnitz entwickelte Verfahren überzeugt durch eine performante Kollisionsanalyse eines neutralen Austauschformats. Hierzu werden die Montageinformationen mit einem AND/OR-Graphen hergeleitet,

dessen Entscheidungsgrundlage Algorithmen zur geometrischen Separierbarkeit und Kostenfunktionen sind. Meshes bzw. Voxmaps dienen als Datengrundlage, womit eine Festlegung auf bestimmte kommerzielle Softwaretools umgangen werden kann. Weiterhin bietet die Definition unterschiedlicher Optimierungsfunktionen Freiheiten bei der Generierung von Montagesequenzen. Die unmittelbaren Ergebnisse sind schließlich valide Montagesequenzen. Jedoch scheitert auch dieses System an der automatisierten Demontage von Schrauben und Sicherungsringen. Daher müssen all diese Bauteile vor der Analyse manuell entfernt werden. Nach der Analyse müssen die entfernten Bauteile schließlich wieder manuell integriert werden, bevor der Optimierungsalgorithmus ausgeführt werden kann. Aus persönlichen Gesprächen mit dem Entwicklungsteam ist bekannt, dass oftmals Kanten vorab erfasst werden müssen, um zu validen Ergebnissen zu gelangen. Ein potenzieller Teillösungsansatz dazu wurde von Andre et al. (2017) durch die Definition von Durchdringungsfaktoren vorgestellt, die bei einer Kollisionsanalyse geschnitten werden dürfen, ohne zu einer Kollision zu führen. Auf diese Weise konnten Gewinde berührt werden, ohne dass es zu einer Erfassung der Kollision kommt. Abbildung 2.18 visualisiert dieses Vorgehen anhand einer Schraube mit einem Zentrierring. So wird die Schraube zunächst voxelisiert und anschließend manuell durch Durchdringungsfaktoren definiert (Andre et al. 2017). Diese Vorgehensweise ist bei der Planung von Montagesequenzen einmalig. Dennoch löst es nicht die Problematik der manuellen Vor- und Nacharbeit. So kann mit diesem Vorgehen zwar die manuelle Arbeit reduziert werden, jedoch müssen diese Durchdringungsfaktoren nach wie vor vorab manuell hinterlegt werden.

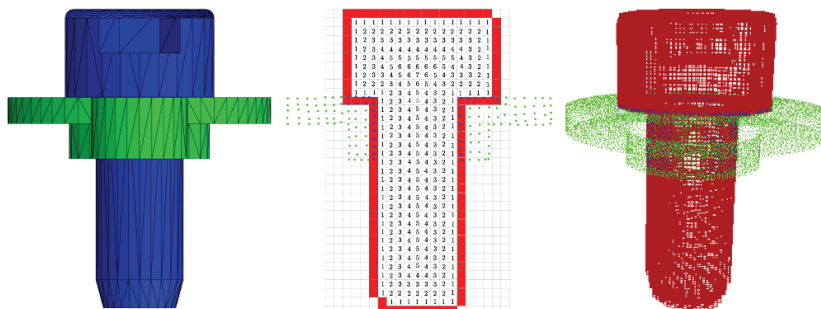


Abbildung 2.18 Darstellung von Durchdringungsfaktoren aus einem Mesh-Modell (Andre et al. 2017)

Auch die anderen Vorreiter des Demontageansatzes, wie Michniewicz et al. (2016) oder Kumar et al. (2021) sahen sich dieser Herausforderung gegenübergestellt. Doch anstelle einer Analyse der 3D-Modelle nutzen diese manuelle Nutzerschnittstellen (Michniewicz et al. 2016) oder ignorierten die Fixierungselemente (Kumar et al. 2021). In der Summe kann gefolgert werden, dass es bis heute noch keine Möglichkeit gibt, alle in Kapitel 2.1 bestimmten Kriterien aus einem demontagebasierten Ansatz zu extrahieren.

2.3.3 Datenextraktion mit featurebasierten Ansätzen

Eine zweite Alternative zur Extraktion montagerelevanter Informationen sind die featurebasierten Ansätze. Wie Abbildung 2.15 veranschaulicht, gibt es einen internen Ansatz, der direkt auf das CAD-System zugreift und einen externen Ansatz auf Basis von Austauschformaten, um die benötigten Features zu extrahieren. Diese Möglichkeiten werden im Folgenden genauer untersucht, doch vorab wird geklärt, was Features in der Montageplanung sind und wofür diese benötigt werden.

2.3.3.1 Features in der Montageplanung

Die Formate von CAD-Modellen sind im Grunde featurebasierte Konstrukte (Zou et al. 2011). So definieren Features 3D-Modelle von den kleinsten Elementen, wie Punkte, Vektoren oder Linien, bis hin zu den Montagebeziehungen zwischen den Bauteilen. Damit sind Features Informationseinheiten, welche geometrische sowie nicht geometrische Attribute der Bauteile und Baugruppen in einem gewissen Abstraktionsgrad beschreiben (Fazio et al. 1987; Shah et al. 1988; VDI 2218).

Aus vorangegangenen Arbeiten haben sich unterschiedliche Definitionen für Features ergeben. So unterscheiden Shah et al. (1988) zu Beginn die Features nach sehr wenigen, spezifischen Eigenschaften, wie dem Werkstoff, der Montagebeziehung oder Toleranzen.

Jedoch wurden mit der Zeit die Features immer vielschichtiger und detaillierter, sodass eine weitere Unterteilung vonnöten war. Die heute gängigste Unterteilung ist die Trennung von Low-level und High-level Features. So unterteilen sich die Low-level Features, wie in Abbildung 2.19 dargestellt, in massenlose Punkte, Linien, Splines, Flächen, Zylinder und sonstige geometrische Freiflächen (Hasan et al. 2016a; Hasan et al. 2016b). Weiterhin werden diese Features nochmal nach ihren Entitäten, wie topologische oder geometrische Features, unterteilt, welche schließlich zu Form Features und Assembly Features führen (Shah et al. 1993; Hasan et al. 2016b).

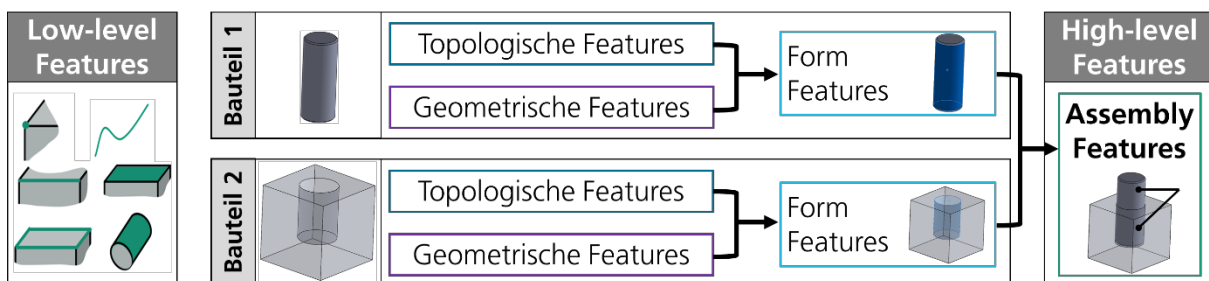


Abbildung 2.19 Low-level und High-level Features, eigene Darstellung in Anlehnung an Neb (2019)

High-level Features hingegen beschreiben die Kombination zweier Form Features mit einer spezifischen Anwendung, wie in Abbildung 2.19 dargestellt. So kann ein High-level Feature eine Kombination von zwei Mantelflächen mit einer konzentrischen Beziehung oder zwei ebenen Flächen mit einem Berührungskontakt sein. High-level Features können sehr vielfältig sein und auch die Bearbeitung, Montage oder Ausrichtung von Bauteilen beschreiben (Sung et al. 2001; VDI 2218; Di Stefano et al. 2004; Hasan et al. 2016b).

Im Rahmen dieser Arbeit sind vor allem die Assembly Features von Relevanz. Assembly Features wurden von van Holland et al. (2000) als räumliche Beziehung zwischen zwei Bauteilen beschrieben, mit dem Fokus auf die Montage. So beinhalten Assembly Features Informationen über die Montagebeziehungen in einer Baugruppe, die über geometrische Formen und über eine spezifische Anwendung definiert werden (Mathew et al. 2010a). Auf die gleiche Weise werden auch schon in der Konstruktion der 3D-Modelle die

Montagebeziehungen direkt im CAD-System definiert. In manchen CAD-Systemen werden diese Assembly Features als „Constraints“ beschrieben. Dies geht darauf zurück, dass jedes Assembly Feature die Freiheitsgrade der Baugruppe reduziert, bis diese vollkommen bestimmt sind (Irfan et al. 2006; Pang et al. 2006).

2.3.3.2 Feature-Extraktion aus CAD-Systemen

Anders als bei den Demontageansätzen unterscheiden sich die internen und externen Ansätze der Feature-Extraktion sehr stark voneinander. Wie schon in Kapitel 2.3.1 angeschnitten wurde, greifen die internen Ansätze über eine systemspezifische API auf das CAD-System direkt zu (Abbildung 2.20). Auf diese Weise kann auf alle enthaltenen Features ohne Konvertierungsverlust zugegriffen werden.

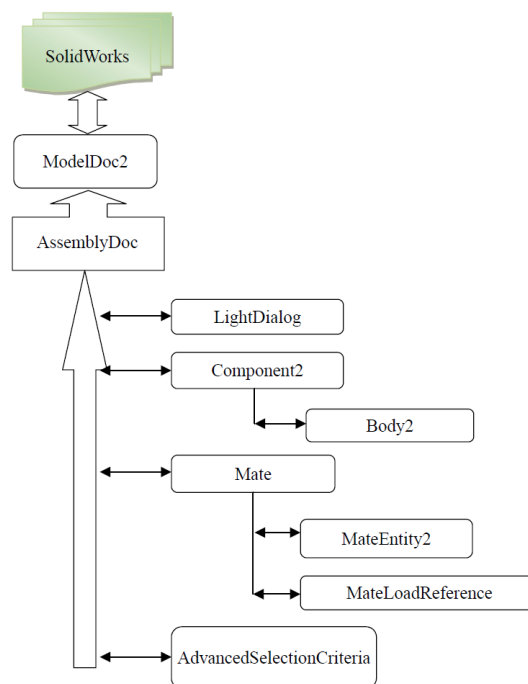


Abbildung 2.20 Feature-Struktur der SolidWorks Baugruppen (Mathew et al. 2010a)

Die ersten internen Ansätze zur Extraktion von Assembly Features wurden von Mathew und Rao (Mathew et al. 2010a, 2010b) vorgestellt. So wurde hierzu über eine API auf das

CAD-System SolidWorks zugegriffen. Der Aufbau des Systemzugriffs und der abzugreifenden Informationen aus den 3D-Modellen ist in Abbildung 2.20 von (Mathew et al. 2010a) modelliert worden. So wird zu Beginn auf das 3D-Modell über die Funktion „ModelDoc2“ zugegriffen und damit das Modell definiert. Anschließend kann über die API auf die drei Hauptdokumente zugegriffen werden: Bauteile (PartDoc), Zeichnungen (DrawingDoc) und Baugruppen (AssemblyDoc). Im Fokus der Untersuchungen steht die gesamte Baugruppe und daher das AssemblyDoc. Nach der Auswahl können schließlich diverse Befehle im FeatureManager aufgerufen werden (Mathew et al. 2010a, 2010b). So können beispielsweise über den Befehl „GetMateEntities“ die Verknüpfungen der Bauteile in der Baugruppe und damit die Assembly Features abgerufen werden. Diese können anschließend nochmal in die SolidWorks-spezifischen Features, wie tangential, senkrecht oder symmetrisch, über den Befehl „GetTypeNames“ ermittelt werden (Mathew et al. 2010a, 2010b). Zu guter Letzt muss noch bestimmt werden, welche der Bauteile in der Baugruppe miteinander verknüpft sind. Dies kann über den Abgleich der Bauteilflächen mit der Funktion „GetFaceID“ realisiert werden (Mathew et al. 2010a, 2010b).

In Mathew et al. (2010b) beschreiben die Autoren eine Methode zur Extraktion von Features aus SolidWorks. Im selben Jahr erweiterten Mathew et al. (2010a) diese Methode, indem aus den extrahierten Features auch die Assembly Features in Form eines Liaison-Graphen modelliert wurden. Zwar wurden mit dieser Methode nicht die Montagesequenzen einer Baugruppe untersucht, jedoch wurde eine neue Möglichkeit der Datenextraktion erforscht.

Hasan erweiterte die Untersuchungen mithilfe seiner Kollegen und Wikander in diversen weiterführenden Arbeiten (Hasan et al. 2014; Hasan et al. 2016a, 2016b; Hasan 2017; Hasan et al. 2017a, 2017b). So wurden in diesen Arbeiten deutlich mehr Features untersucht und aus SolidWorks extrahiert. Anschließend wurden die Features in ihrer Grundform ontologisch modelliert. Das Ziel war es, die extrahierten Features so zu

modellieren, dass diese als Austauschformat zwischen unterschiedlichen CAD-Systemen und Montageplanungssystemen genutzt werden können. Wie Abbildung 2.21 veranschaulicht, war es angedacht, dass sämtliche Features aus einem CAD-System mithilfe einer graphischen Nutzerschnittstelle (engl. Graphical User Interface oder GUI) und der API zu extrahieren, im Anschluss zu modellieren und dann wieder von einem anderen System über eine API einzulesen (Hasan et al. 2017b). Besonders der Einsatz in der Montageplanung wurde immer wieder hervorgehoben, jedoch bis heute nicht realisiert. Nichtsdestotrotz haben die Autoren in ihren Arbeiten das immense Potenzial der internen Ansätze und der verfügbaren Features aufweisen können.

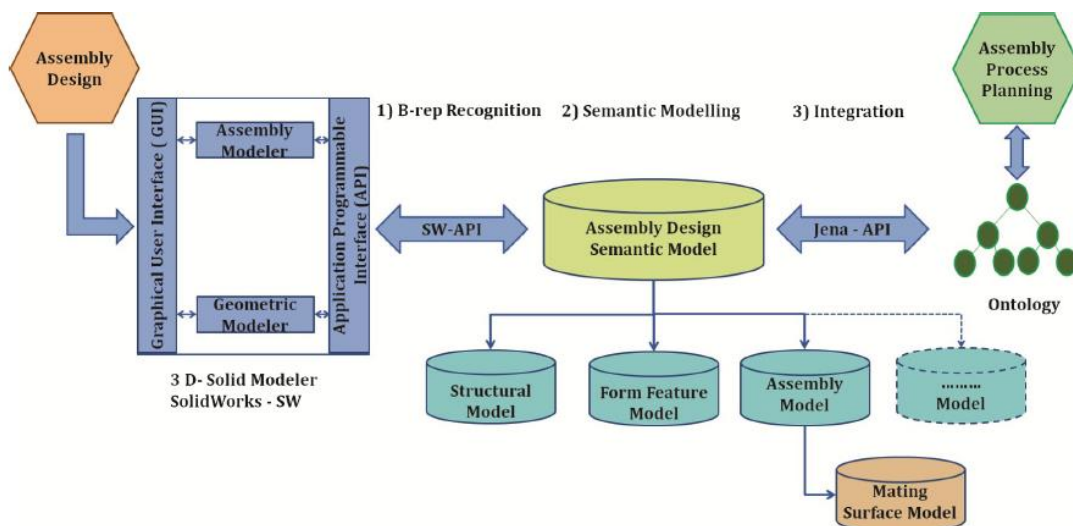


Abbildung 2.21 Framework der Feature-Extraktion-Methode (Hasan et al. 2017b)

2.3.3.3 Feature-Extraktion aus Austauschformat

Zwar gibt es bis heute noch keine internen Ansätze zur Nutzung der Features für eine vorteilhafte Montagesequenzgenerierung, jedoch existieren diese für die externen Ansätze. Ausgangspunkt für externe Ansätze sind Austauschformate. Daher haben sich über die Zeit unterschiedliche Ansätze für unterschiedliche Formate ergeben. Ein Nachteil dieser sehr unterschiedlichen neutralen Formate ist allerdings, dass die Ansätze zur Extraktion von Daten nicht untereinander kompatibel sind. So kann eine Methode, die für

die Datenextraktion im Datenformat IGES entwickelt wurde, nicht auf die Datenextraktion in anderen Formaten angewandt werden (Pal et al. 2005).

Das am weitesten verbreitete Format, um 3D-Modelle neutral zu analysieren, ist das Datenformat der ISO 10303 „Standard for the exchange of product model data“ (STEP) (Anderl et al. 2000; ISO 10303-242). Hierbei handelt es sich um ein etabliertes maschinenlesbares Format, das von einer Vielzahl an Anwendungen unterstützt wird. Weiterhin konnte sich dieses Format auch durch seine vorteilhafte Wiederverwendbarkeit und Langzeitfähigkeit beweisen (Anderl et al. 2000).

Die gängigsten Ansätze zur Extraktion montagerelevanter Informationen, wie Assembly Features, basieren auf der STEP-Datei mit den Application Protocols (AP) 203 und 214 (kurz: STEP AP203/AP214). Die STEP AP203 ist für die 3D-Darstellung von mechanischen Bauteilen und Baugruppen mit dem Fokus auf die Luft- und Raumfahrtindustrie ausgelegt. Daher wurde der Aufbau der STEP-Datei für den Austausch von Rahmen-, Flächen- und Grenzflächendarstellungen erweitert (Anderl et al. 2000). Die STEP AP214 hingegen ist auf mechanische Konstruktionsprozesse im Automobilbau ausgelegt. So ist dieses AP für den Austausch entwicklungsrelevanter Daten, wie Farben, geometrische Abmessungen und einige wenige Toleranzen ausgelegt (Anderl et al. 2000).

So wagte sich über die Jahre eine Vielzahl an Fachleuten an die Montagesequenzgenerierung aus STEP-Dateien. Eine der ersten Herausforderungen bei der Extraktion der Informationen ist der eingeschränkte Informationsgehalt durch die Konvertierungsverluste. So sind gerade die fehlenden Verknüpfungen der Assembly Features, die schon in der Konstruktionsphase festgelegt wurden, ein Problem. Somit müssen diese erst wieder aus Low-level Features generiert werden (Abbildung 2.19). Dieses Vorgehen ist allerdings limitiert in seiner Umsetzbarkeit. Ein Beispiel für das aufwendige Auslesen eines Form Features findet sich in Anhang 9.2.

Basierend auf diesem Vorgehen haben Mok et al. (2001) erste Assembly Features aus Low-level Features extrahiert. Zwar konnten schon erste Montagegraphen mit diesen Informationen erstellt werden, jedoch waren diese in der Summe nicht ausreichend für eine vollständige Montageplanung. Zur Überbrückung dieses Mangels an extrahierten Informationen halfen sich Forscher/-innen in den vergangenen Jahren oftmals mit vorgelagerten manuellen Schritten wie Zha et al. (2002) oder nachgelagerten manuellen Schritten wie Lau et al. (2005). Auf diese Weise konnten zwar Montagesequenzen bestimmt werden, jedoch nur mit einem erheblichen manuellen Aufwand.

Ende 2014 wurde die neueste Generation der STEP-Datei mit der AP242 nach der ISO 10303-242 veröffentlicht. Damit ist die STEP-Datei nun erstmals in der Lage, modellbasierte Informationen zu übermitteln und ist damit auch fähig, erste Assembly Features zu konvertieren (Lubell et al. 2013). Seit 2018 unterstützen alle gängigen CAD-Systeme dieses Format und eröffnen damit nun die Chance auf weitere Untersuchungen. So nutzte Wardhani et al. (2016), unter der Leitung des renommierten STEP-Analyse Forschers Xu, hierbei als erstes die Gelegenheit und untersuchte die Einsatzmöglichkeiten des neuesten Formats. So wurde besonders aufgrund der nun in der STEP AP242 enthaltenen „Product Manufacturing Information“ (PMI) ein erhöhtes Einsatzpotenzial in der Montageplanung erkannt, jedoch nicht weiter spezifiziert. Auch in nachfolgenden Arbeiten zu diesem Thema (Wardhani et al. 2016; Wardhani et al. 2018) konnten keine expliziten Ergebnisse dazu veröffentlicht werden.

Zusammengefasst wird ersichtlich, dass die featurebasierten Verfahren weniger detailliert erforscht wurden als demontagebasierte Ansätze. Allerdings lassen sich über einen featurebasierten Ansatz deutlich mehr Informationen aus 3D-Modellen extrahieren, auch wenn alle bisherigen Ansätze noch fehleranfällig sind.

2.3.4 Fazit zur Montageplanung mit Schnittstellen zu 3D-Modellen

Das Ziel dieser Arbeit ist es, automatisiert aus einem 3D-Modell sämtliche benötigten Montageinformationen zu extrahieren, um daraus optimierte Montagesequenzen zu generieren. Kapitel 2.3 durchleuchtete die Informationsgrundlage für alle weiteren Untersuchungen und stellt die Ergebnisse dazu in Tabelle 2.2 dar. So bieten Demontageansätze zwar einen einfachen Zugang zu geometrischen Restriktionen, jedoch liegt der große Vorteil featurebasierter Ansätze in der Unterscheidung von Assembly Features und Extraktion von Bauteileigenschaften. Es zeigte sich, dass die demontagebasierten Ansätze zwar deutlich fortgeschrittener sind als alle vergleichbaren Ansätze, allerdings verdeutlicht genau dieser fortgeschrittene Entwicklungsstand auch die Grenzen des Ansatzes. So ist vor allem die Einschränkung der zu extrahierenden Montagebeziehungen hervorzuheben. Weiterhin zeigte sich, dass featurebasierte Ansätze, verglichen zu Demontageansätzen, zwar zu einem höheren Aufwand bei der Auswertung führen, jedoch deutlich mehr Montageinformationen aus einem 3D-Modell extrahieren können. Weiterhin zeigte sich, dass sich demontagebasierte Ansätze aufgrund der steifen Verbindungen ausschließlich mit manuellen Arbeitsinhalten realisieren lassen.

Tabelle 2.2 Vergleich von Demontageansätzen und featurebasierten Ansätzen

	Demontageansätze	Featurebasierte Ansätze
Bestimmung von geometrischen Restriktionen		
Unterscheidung von Assembly Features		
Extraktion von Bauteileigenschaften (Material, Gewicht, usw.)		
Aufwand bei der Auswertung von Montageinformationen		
Geschätztes Potenzial einer automatischen Realisierung		

Zusammengefasst lassen sich mithilfe eines featurebasierten Ansatzes mehr Bewertungs- und Optimierungskriterien erfassen und in eine Lösung integrieren. Zwar muss erst noch eine umfassende Vorgehensweise dazu ausgearbeitet werden, jedoch deutet der Stand der Technik das Potenzial an. Ungeprüft ist allerdings noch, ob sich hierfür ein interner oder ein externer Ansatz am besten eignet.

2.4 Kommerziell verfügbare Lösungen

Das Problem der Montageplanung ist bereits so altbekannt wie die Montage selbst. So haben sich gerade Anbieter von CAD- und 3D-Software damit beschäftigt, wie 3D-Modelle zur Planung der Montage weiterverwendet werden können. Vorab muss erwähnt werden, dass unabhängig vom Anbieter dieser Softwarelösungen, die Montagesequenzen immer vollkommen manuell erstellt werden müssen. Die kommerziellen Softwarelösungen selbst helfen den Nutzern lediglich, die Dokumentation zu vereinfachen. Dennoch zeichnen sich digitale Werkzeuge aus dem industriellen Bereich besonders durch ihren vorteilhaften Umgang mit 3D-Modellen aus. Zur Prüfung von potenziellen Vorteilen und der potenziellen Eignung für weitere Untersuchungen werden daher vier gängige digitale Werkzeuge untersucht: NX Animation Designer (Siemens AG), SolidWorks Composer (Dassault Systèmes S.E.), XVL Studio 3D CAD Corel Edition (Corel Corporation) und Bricklink Studio 2.0 (LEGO BrickLink, Inc).

2.4.1 Interaktion mit 3D-Modellen

Bei den ersten beiden Systemen handelt es sich um Softwareerweiterungen großer, namhafter CAD-Software-Anbieter mit einer internen Anbindung direkt an das CAD-System. Auf den zweiten Blick jedoch unterscheiden sich beide Programme in ihren Einsatzgebieten. So spezialisiert sich der „NX Animation Designer“ verstärkt auf die Animierung einzelner Montageprozesse, während der „SolidWorks Composer“ sich um Grafikmaterialien, überwiegend in Papierform, bemüht. Als unabhängige Alternative für

die Visualisierung von Montageprozessen ist die Software „XVL Studio 3D CAD Corel Edition“ zu nennen. Diese bietet keine Schnittstellen zu CAD-Systemen an und ist damit als externer Ansatz zu verstehen. Zum Abschluss, wird „Bricklink Studio 2.0“ als digitales Werkzeug zur Planung von Noppenstein-Baugruppen untersucht, welches sich durch die automatische Erstellung von Montageanleitungen auszeichnet.













In Bezug auf die Schnittstellen zu den CAD-Modellen haben die Erweiterungen von „Siemens“ und „Dassault Systèmes“ die bessere Ausgangssituation. Durch den direkten Zugriff auf die CAD-Daten können deutlich mehr Informationen abgegriffen werden. So können Achsen von beweglichen Elementen definiert werden. Weiterhin bietet der Zugriff auf die internen Assembly Features auch die Möglichkeit, Montagebeziehungen zu nutzen. Möglich wird dies indem Bauteilhierarchien und Meta-Daten direkt aus den CAD-Systemen importiert werden. Die Software der „Corel Corporation“ hingegen basiert auf neutralen Austauschformaten und ist damit nicht in der Lage, diesen Detaillierungsgrad an Informationen aus den Formaten zu gewinnen. Ein besonderer Vorteil ist allerdings das unterstützte XVL-Format. Mithilfe des XVL-Formats können CAD-Daten auf ungefähr das Hundertfache reduziert werden und unterstützen damit auch die Datenverarbeitung auf schwächeren Rechnern (Wakita et al. 2000). Ganz im Gegensatz dazu bietet die Bricklink-Software ausschließlich die Option Baugruppen selbst zu erstellen und zu verarbeiten.

2.4.2 Fazit zu kommerziell verfügbaren Lösungen

Es zeigte sich, dass die aktuellen kommerziell verfügbaren Lösungen nicht darauf ausgelegt sind, die Montagesequenzen zu bestimmen. Die Softwarelösungen sind eher darauf konzipiert, die Montageprozesse zu visualisieren und zu dokumentieren. So wird auch zur Bedienung dieser Werkzeuge ein erweitertes Fachwissen benötigt, welches auch eine bereits bekannte Montagesequenz voraussetzt. Wie jedoch in Kapitel 1.2 gezeigt wurde, führt die manuelle Bildung von Montagesequenzen häufig zu Fehlern und unzufriedenstellenden Resultaten.

So wird ersichtlich, dass der interne Ansatz der CAD-Hersteller, aufgrund der nativen Daten, deutlich umfangreicher ist im Vergleich zu externen Datenformaten (Tabelle 2.3). Im absoluten Gegenteil dazu ist „Bricklink Studio 2.0“ zu nennen. Zwar ist die interne Interaktion mit den 3D-Modellen sehr gut, allerdings ist das Vorgehen nur auf Noppensteine beschränkt, was die Anwendung aller anderen Produktmodelle ausschließt. Jedoch ist die Erstellung der Noppenstein-Montagepläne sehr hervorzuheben. So werden auf Basis der generierten Bausteine direkt Montagepläne abgeleitet. Nachteil dieses Vorgehens ist allerdings die starke Nutzerabhängigkeit in der Erstellung, die besonders bei unerfahrenen Nutzern zu Fehlern führen kann. Der Fokus des „NX Animation Designer“ ist lediglich die manuelle Erstellung kinematischer Animationen. Der „SolidWorks Composer“ hingegen bietet hilfreiche Funktionen zur Visualisierung der Montagepfade und Ergänzung von Montageinformationen. Mithilfe von Plug-Ins können diese Aufnahmen direkt in ein Textverarbeitungsprogramm übertragen werden. So verwendet die Software zwar 3D-Modelle zur Interaktion, allerdings nur um daraus manuell 2D-Bilder zu erstellen. Ein ähnliches Vorgehen findet sich auch in „XVL Studio 3D CAD Corel Edition“. Allerdings ist die Umsetzung deutlich komplexer, da vorerst manuell Hierarchieebenen erstellt werden müssen und damit die Planung großer Baugruppen sehr aufwendig macht. Eine automatische Planung der Montagesequenzen ist bei keinem der Werkzeuge möglich. Zusammenfassend zeigt sich, dass heutige kommerziell verfügbare Lösungen als Autorenwerkzeuge zu verstehen sind und nicht als Planungswerkzeuge.

Tabelle 2.3 Übersicht zu kommerziell verfügbaren Lösungen

	NX Animation Designer	SolidWorks Composer	XVL Studio 3D CAD Corel Edition	Bricklink Studio 2.0
Interaktion mit 3D- Modellen				
Erstellen von Montageplänen				
Automatische Planung der Montagesequenzen				

3 Konzept

Wie aus dem Stand der Technik aus Kapitel 2 ersichtlich wird, scheitern bisherige Ansätze an zwei Problemen. Zum einen fehlt es an einer stabilen Schnittstelle zu einem 3D-Modell, aus der sich ausreichend Montageinformationen für eine Montagesequenzgenerierung ableiten lassen. Des Weiteren mangelt es an einem Ansatz, um aus diesen Montageinformationen Montagesequenzen zu generieren. Weiterhin kristallisierte es sich in Kapitel 1.2 heraus, dass das CAD-System die Basis der heutigen Entwicklung darstellt. Zur Entwicklung der Produkte sind Konstrukteur/-innen auf den modellbasierten Aspekt der CAD-Systeme angewiesen (Eigner et al. 2014). Mithilfe dieser CAD-Systeme werden Modelle der zu entwickelnden Produkte konstruiert und in Tests virtuell erprobt. Diese dreidimensionalen CAD-Modelle werden im Entwicklungsprozess kontinuierlich angepasst und optimiert, bis das finale Produkt virtuell fertiggestellt ist. Das Resultat dieser Berechnungen und Untersuchungen ist ein 3D-Modell einer Baugruppe in einem CAD-System. Daher sollte der Ausgangspunkt sämtlicher weiterführender Untersuchungen zur Generierung von Montagesequenzen immer das 3D-Modell eines CAD-Systems sein und kein theoretischer Ansatz, wie er oftmals in der Vergangenheit genutzt wurde.

Die Vorarbeit der folgenden Untersuchungen wurde schon unter dem Titel „Review on Approaches to Generate Assembly Sequences by Extraction of Assembly Features from 3D Models“ (Neb 2019) im Rahmen der CIRP Manufacturing Systems Conference 2019 veröffentlicht und wird im Folgenden detaillierter aufgearbeitet und erweitert.

3.1 Extraktion von Montageinformationen aus einem 3D-Modell

Zur Extraktion von Montageinformationen aus einem 3D-Modell bedarf es einer Datenbasis, um die in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Features identifizieren zu können. Wie sich im Stand der Technik zeigte, gab es in der Vergangenheit lediglich Ansätze für die Extraktion einiger weniger Features und damit keinen ganzheitlichen Ansatz, der in der

Lage ist, strukturiert unterschiedliche Arten von Features zu extrahieren. Somit wird zu Beginn der Untersuchungen ein Anwendungsfall bestimmt, aus dem diverse Features und Bauteileigenschaften extrahiert werden sollen. Anhand eines einheitlichen Anwendungsfalles und mithilfe definierter Features sollen unterschiedliche Extraktionsarten erprobt, evaluiert und miteinander verglichen werden. Gewählt wurde hierbei ein etablierter Anwendungsfall in der Analyse von Montagesequenzen, das „bolt-nut plate fixing“ von Viganò et al. (2012). Abbildung 3.1 veranschaulicht den Anwendungsfall und die darin enthaltenen Features und Bauteileigenschaften.

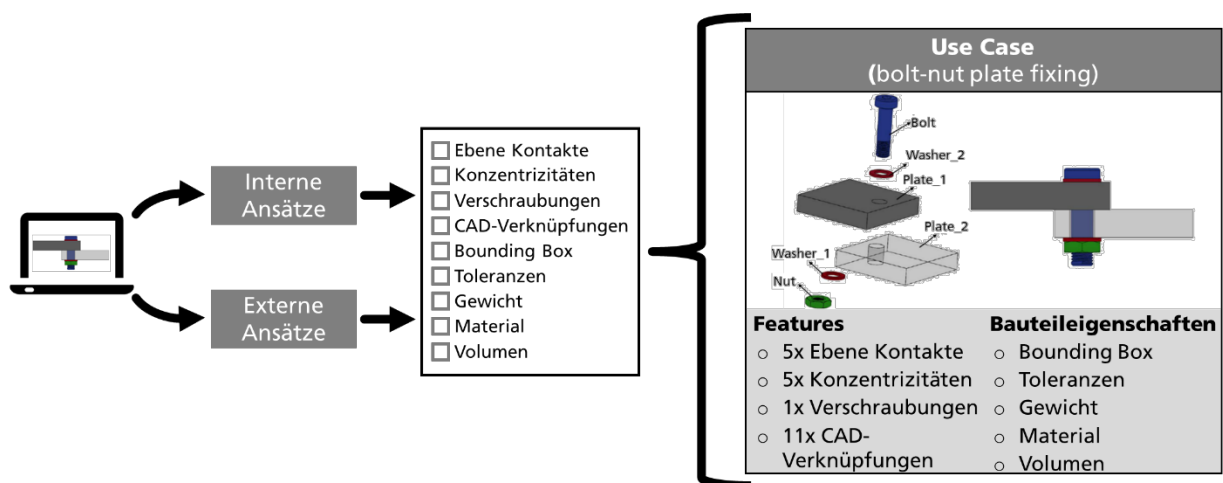


Abbildung 3.1 Zu extrahierende Montageinformationen aus dem Anwendungsfall „bolt-nut plate fixing“

In Summe finden sich in dem Anwendungsfall aus Abbildung 3.1 fünf ebene Kontakte, fünf Konzentritäten, eine Verschraubung und elf Verknüpfungen, die im CAD-System direkt modelliert werden. Weiterhin sollen auch Bauteileigenschaften wie die Bounding Box, Bauteiltoleranzen, Gewicht, Material und Volumen direkt aus dem 3D-Modell bestimmt werden. Alle aufgezählten Montageinformationen basieren auf Untersuchungen unterschiedlicher Autoren aus dem Stand der Technik. In der Vergangenheit konnte zwar noch kein Ansatz entwickelt werden, der sämtliche Inhalte extrahieren konnte, allerdings weisen diese Informationen eine besondere Relevanz bei der Ableitung der Montagesequenz auf. Im Folgenden sollen die montagerelevanten Informationen direkt aus einem 3D-Modell extrahiert werden.

Hierbei kann wiederum auf die internen und externen Ansätze zurückgegriffen werden. Aufgrund des verlustfreien Zugriffs auf die 3D-Modelle ist es naheliegend, dass sich mit einem internen Ansatz die meisten Montageinformationen extrahieren lassen. Der Nachteil des internen Ansatzes liegt allerdings in der Abhängigkeit von den CAD-Systemen. Somit ist der große Vorteil der externen Ansätze, dass diese auf neutralen Austauschformaten basieren. Der Nachteil wiederum beruht in dem Informationsverlust aufgrund von Konvertierung (Miao et al. 2002; Hasan et al. 2016a; Neb 2019). Falls sämtliche beschriebenen Montageinformationen aus Abbildung 3.1 sich mithilfe eines externen Ansatzes extrahieren ließen, würde dies einen deutlich flexibleren Ansatz darstellen und wäre damit im primären Fokus.

3.1.1 Feature-Extraktion mit externen Ansätzen

Externe Ansätze sind dateibasierte Ansätze, die neutrale Datenformate verwenden, wie STEP-, IGES- oder XML-Dateien. Wie im Stand der Technik ausgearbeitet wurde, bietet das STEP-Format nach der ISO 10303 das höchste Potenzial zur Extraktion von Features. Bei der Generierung von STEP-Dateien kommt es zu Informationsverlusten, wie bei externen Ansätzen üblich. Allerdings gibt es, wie in Kapitel 2.3.3.3 herausgearbeitet wurde, unterschiedliche APs von STEP-Dateien und damit auch unterschiedliche Informationsverluste. Besonders hervorzuheben sind hierbei die gängigsten Formate mit den AP203 und AP214 sowie das neueste Format mit der AP242.

3.1.1.1 AP203 und AP214

Zur Untersuchung der Datenextraktion wurde das OCCT Tool-Kit in Anlehnung an Thothara (2019) genutzt. Dieses Tool Kit entspricht hierbei industriellen Anforderungen und stellt Bibliotheken für topologische und geometrische Untersuchungen von STEP-Dateien bereit. So können beispielsweise ebene Kontakte über Berührungsflächen unterschiedlicher Ebenen bestimmt werden. Jedoch gibt es bisher noch keine bekannte

Lösung zur Bestimmung von Schraubverbindungen. So bestimmten auch Ou et al. (2013) und Thothara (2019) Verschraubungen lediglich über Suchbegriffe, wie „Screw“ oder „Helix“ und nicht über die Geometrie.

Aus diesem Grund wurde gezielt versucht, Verschraubungen über Low-level Features zu identifizieren. So wurden konzentrische Verknüpfungen über die Verbindung zwischen einem Zylinder und einer Bohrung, die den gleichen oder einen größeren Radius haben, ausgelesen. Im Falle einer zylindrischen Verbindung muss allerdings noch eine zweite Prüfung zeigen, ob es sich hierbei um eine Schraubverbindung handelt. Wenn der Radius der Bohrung kleiner ist als der Radius des Vollzylinders, prüft die Analyse die Geometrien auf Features, die auf ein Gewinde hinweisen. Bei einer positiven Prüfung kann von einer Schraubverbindung ausgegangen werden. Dennoch war der entwickelte Ansatz dennoch nicht in der Lage, ein Gewinde zu identifizieren. Dies liegt vor allem daran, dass STEP-Dateien keine Informationen über kosmetische Gewinde enthalten. Kosmetische Gewinde sind Gewinde, die Konstrukteur/-innen mithilfe der Gewinde-Feature-Funktion des jeweiligen CAD-Systems erzeugen. Diese kosmetischen Gewinde werden in der 3D- und der 2D-Zeichnung als Gewinde angezeigt, sind jedoch nicht in den STEP-Dateien mit der AP203 und AP214 hinterlegt (Neb 2019). Abbildung 3.2 veranschaulicht hierbei den Unterschied der Darstellungen. So muss zur geometrischen Darstellung eines Gewindes eine Helixfunktion auf einem Zylinder angewandt werden. Diese Umsetzung ist jedoch aufwendig und entspricht nicht dem Konstruktionsstandard.

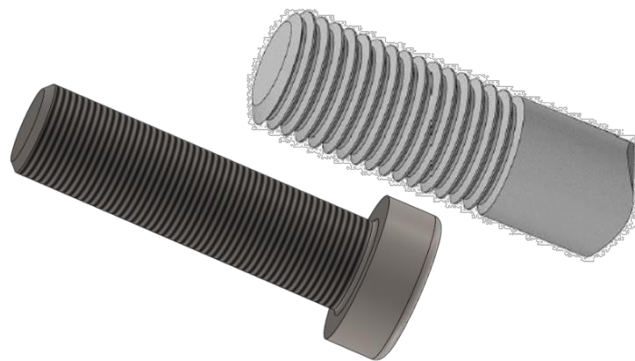


Abbildung 3.2 Darstellung eines kosmetischen Gewindes (unten) und eines geometrischen Gewindes (oben)

Das Ergebnis der Feature-Extraktion aus den STEP-Formaten mit AP203 und AP214 besteht darin, dass ebene Kontakte, konzentrische Kontakte, die Bounding Boxes und das Volumen identifiziert werden können. Allerdings konnten aufgrund der Konvertierungsverluste weder Verschraubungen noch CAD-Verknüpfungen oder Toleranzen gefunden werden. Weiterhin bedarf es zur Bestimmung des Gewichtes (m) neben dem gefundenen Volumen (V) auch der Dichte (ρ) des Körpers (siehe Formel 3.1). Allerdings ist es bei einer STEP-Datei zum heutigen Zeitpunkt nicht möglich, Materialinformationen aus einem CAD-System zu extrahieren. Dies liegt primär daran, dass Materialinformationen noch zu einem großen Teil als Textinformationen in CAD-Systemen hinterlegt sind.

$$m = V * \rho \quad (3.1)$$

3.1.1.2 STEP AP242

Im Jahr 2014 wurde die bisher letzte Generation des neutralen STEP-Austauschformats nach ISO 10303-242 veröffentlicht. Diese ist erstmals in der Lage, modellbasierte Informationen zu extrahieren. Mit diesem neuen Standard soll es möglich sein, High-level Features und Toleranzen in einem neutralen Austauschformat zu integrieren. Seit 2018 unterstützen auch die ersten CAD-Systeme das neue STEP-Format.

Schon vor Veröffentlichung der AP242 waren die Erwartungen hoch und es wurde schon von einem möglichen „Game Changer“ berichtet (Lubell et al. 2013). Versuche in dieser Arbeit mit dem Format AP242 haben jedoch nur zu kleinen Verbesserungen geführt. Zwar können, wie in Kapitel 2 hervorgehoben, einige High-level Features direkt aus dem Format ausgelesen werden, ohne die aufwendige Analyse von Low-level Features, allerdings ist dies nur für einige wenige Features bisher nachgewiesen worden. Darüber hinaus sind die gefundenen Erweiterungen sehr begrenzt. Dies beruht auf der Tatsache, dass in bisherigen Untersuchungen mit dem STEP AP203 und AP214 mit vertretbarem Aufwand

die gleichen Ergebnisse erzielt werden konnten. Daher kann die große Verbesserung bei der Feature-Extraktion mit dem STEP AP242 nicht bestätigt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein externer featurebasierter Ansatz nicht die gewünschten Ergebnisse liefern kann. Abbildung 3.3 veranschaulicht die Ergebnisse der Untersuchungen. So konnte das STEP-Format mit AP242, verglichen zu den gängigen Formaten AP203 und AP214, lediglich Informationen zu Toleranzen extrahieren. In der Summe überwiegen damit die Nachteile fehlender Assembly Features gegenüber den Vorteilen des neutralen Austauschformats. Als besonders stabil stellte sich allerdings die Möglichkeit heraus, aus Low-level Features High-level Features zu generieren. Somit müssen fehlende Assembly Features nicht zu einem direkten Nachteil interpretiert werden.

STEP AP203/214 (ISO 10303-203/214)	STEP AP242 (ISO 10303-242)
<input checked="" type="checkbox"/> Ebene Kontakte	<input checked="" type="checkbox"/> Ebene Kontakte
<input checked="" type="checkbox"/> Konzentritäten	<input checked="" type="checkbox"/> Konzentritäten
<input checked="" type="checkbox"/> Verschraubungen	<input checked="" type="checkbox"/> Verschraubungen
<input checked="" type="checkbox"/> CAD-Verknüpfungen	<input checked="" type="checkbox"/> CAD-Verknüpfungen
<input checked="" type="checkbox"/> Bounding Box	<input checked="" type="checkbox"/> Bounding Box
<input checked="" type="checkbox"/> Toleranzen	<input checked="" type="checkbox"/> Toleranzen
<input checked="" type="checkbox"/> Gewicht	<input checked="" type="checkbox"/> Gewicht
<input checked="" type="checkbox"/> Material	<input checked="" type="checkbox"/> Material
<input checked="" type="checkbox"/> Volumen	<input checked="" type="checkbox"/> Volumen

Abbildung 3.3 Ergebnisse der Extraktion montagerelevanter Informationen aus STEP-Formaten der ISO 10303

3.1.2 Feature-Extraktion mit internen Ansätzen

Interne Ansätze extrahieren Features direkt aus CAD-Systemen. Hierzu wird über die systemspezifische API auf die CAD-Systeme zugegriffen. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist die Abhängigkeit vom CAD-System. Für die weiteren Untersuchungen wurde die SolidWorks API gewählt, da SolidWorks die am weitesten verbreitete CAD-Software ist und damit die größte Nachfrage aus Industrie und Forschung erfährt (Prawel 2010;

Thothara 2019). Ziel der Untersuchungen ist es, herauszufinden, wie gut High-level und Low-level Features aus dem CAD-System SolidWorks extrahiert werden können. So bietet die SolidWorks API die Möglichkeit, 3D-Modelle anzupassen und Zugriff auf weitere Konstruktionsinformationen zu erhalten. Sie kann mit der Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA) bedient werden und gestattet den Zugriff auf sämtliche Features der geöffneten Baugruppe und deren Hintergrundinformationen auf Textbasis. So kann auch auf Informationen zur Dichte, zum Gewicht und zum Material der Bauteile zugegriffen werden.

Der größte Vorteil für den direkten Zugriff auf das CAD-System ist allerdings die Möglichkeit, CAD-Verknüpfungen, die Konstrukteurinnen und Konstrukteure zuvor definierten, auszulesen und damit der direkte Zugang zu den High-level Features (Neb 2019). Jedes Assembly Feature zwischen zwei Bauteilen schränkt zwei von sechs Freiheitsgraden eines Bauteils ein. Wenn beispielsweise ein Bauteil drei dieser Assembly Features der bestehenden Baugruppe aufweist, so hat es keine Freiheitsgrade mehr, d. h. es kann sich nicht mehr innerhalb des CAD-Systems bewegen. Die maximale Anzahl an Assembly Features zwischen zwei Bauteilen beträgt damit drei, jede weitere Verknüpfung würde das 3D-Modell überbestimmen und zu Fehlermeldungen führen.

Allerdings ist anzumerken, dass Assembly Features zwar den Freiheitsgrad zwischen Bauteilen definieren, jedoch haben Untersuchungen gezeigt, dass diese nicht zwingend auch alle Bauteilverbindungen darstellen (Neb 2019). Abbildung 3.4 zeigt hierzu eine beispielhafte Baugruppe, die aus drei Teilen besteht. Teil (A) ist dreimal mit Teil (B) verknüpft. Weiterhin ist Teil (A) nochmals mit Teil (C) mit drei Assembly Features verknüpft. Somit sind alle Bauteile bestimmt und keines der Bauteile hat noch offene Freiheitsgrade. Damit können keine weiteren Verknüpfungen im 3D-Modell hinterlegt werden. Folglich führt dies zu sechs Assembly Features zwischen den Bauteilen (A), (B) und (C). Doch leider entspricht dies nicht der Realität, da auch ein Kontakt zwischen den Bauteilen (B) und (C) existiert, der jedoch nicht im 3D-Modell hinterlegt werden kann.

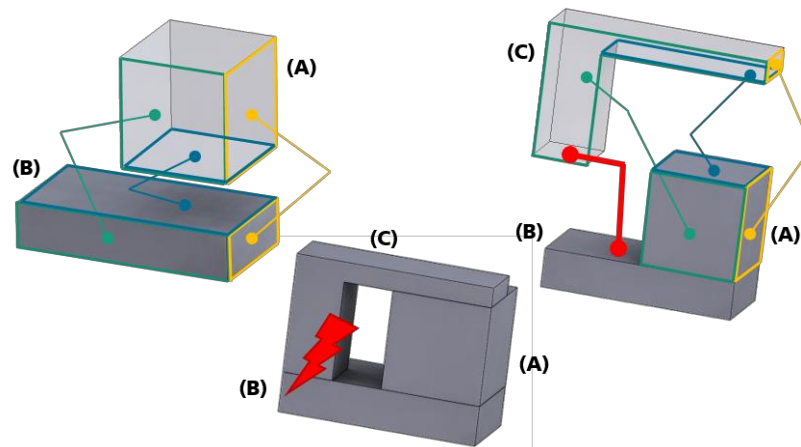


Abbildung 3.4 Manuell hinterlegte CAD-Verknüpfungen in Anlehnung an Neb (2019)

Es ist also nicht möglich, sämtliche relevanten Montageinformationen ausschließlich aus den vorhandenen Features eines CAD-Systems zu extrahieren (Neb 2019). Alle benötigten Informationen konnten zwar abgerufen und zugeordnet werden, allerdings ist nicht auszuschließen, dass Assembly Features übersehen werden. Weiterhin kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass Verknüpfungen bei der Konstruktion vergessen, ausgelassen oder fehlerhaft gesetzt werden. Zwar ist der Zugriff auf die High-level Features die einfachste Möglichkeit, Informationen aus einem 3D-Modell zu extrahieren, allerdings kann nicht angenommen werden, dass immer alle ebenen oder konzentrischen Kontakte, Verschraubungen und die Bounding Box auch sicher gefunden werden (Abbildung 3.5).

SolidWorks API (High-level Features)	
<input type="checkbox"/>	Ebene Kontakte
<input type="checkbox"/>	Konzentritäten
<input type="checkbox"/>	Verschraubungen
<input checked="" type="checkbox"/>	CAD-Verknüpfungen
<input type="checkbox"/>	Bounding Box
<input checked="" type="checkbox"/>	Toleranzen
<input checked="" type="checkbox"/>	Gewicht
<input checked="" type="checkbox"/>	Material
<input checked="" type="checkbox"/>	Volumen

Abbildung 3.5 Ergebnisse der Extraktion montagerelevanter Informationen aus High-level Features in CAD-Systemen

3.1.3 Feature-Extraktion mit einem kombinierten Ansatz

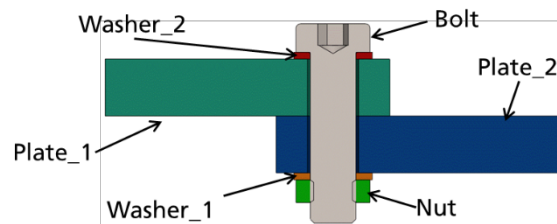
Die vorangegangenen Abschnitte verdeutlichen, dass ein externer Ansatz, wie der der Analyse von STEP-Formaten, in der Lage ist, aus Low-level Features die benötigten High-level Features zu extrahieren. Allerdings scheiterten diese Ansätze an den Konvertierungsverlusten. Parallel dazu konnten bei einem internen Ansatz sämtliche der vorbestimmten Informationen in einem gewissen Maße gefunden werden. Allerdings führte die Extraktion dieser Informationen allein auf Basis von High-level Features zu keinem aussagekräftigen Ergebnis. Dies lag vor allem daran, dass die Chance auf ein fehlerhaftes Ergebnis durch fehlende Verknüpfungen sehr hoch ist.

Ein Blick auf die Ergebnisse der externen und internen Ansätze in den Abbildungen 3.3 und 3.5 zeigt allerdings auch, dass diese sich ergänzen könnten. Zwar wäre es unsinnig, einen externen Ansatz mit einer STEP-Datei und einen internen Ansatz in einem CAD-System gleichzeitig einzusetzen. Allerdings kann das Vorgehen zur Generierung von High-level Features aus Low-level Features auch direkt in einem CAD-System realisiert werden. Jedoch gibt es, abgesehen von der eigenen Veröffentlichung in Neb (2019), bisher noch keinen dokumentierten Ansatz dazu. Ein solches Vorgehen würde sich stark von der Vorgehensweise der externen Extraktion unterscheiden, indes das Potenzial bieten, die gesuchten Features sicher zu identifizieren.

Den Zugriff auf die Features in einem CAD-System bietet die systemspezifische API. Durch Einsatz eines Makros können die Informationen abgerufen werden. Mithilfe dieser Makros wiederum können geometrische sowie nicht geometrische Attribute jedes Bauteils bzw. der Baugruppe aufgerufen werden. Die Analyse und der Abgleich der Features sind hierbei vergleichbar mit der der STEP-Datei, allerdings ist die Systematisierung der Low-level Features über das CAD-System deutlich weniger abstrakt und benötigt daher auch weniger Abfragen.

Zur Bestimmung von ebenen Kontakten sucht der Algorithmus beispielsweise alle Bauteile nach ebenen Flächen ab und vergleicht diese mit den Flächen der anderen Bauteile. Falls es hierbei zu Übereinstimmungen kommt, kann von einem ebenen Kontakt als Assembly Feature ausgegangen werden. Ein Beispiel hierfür stellt die Beziehung zwischen „Plate_1“ und „Plate_2“ in dem Anwendungsfall in Abbildung 3.6 dar. Für eine leserliche Darstellung wurden zudem die Ergebnisse in einer Adjazenz-Matrix visualisiert.

Bauteile	Bolt	Washer_1	Nut	Plate_1	Washer_2	Plate_2
Bolt		0	4	0	3	0
Washer_1	2		1	0	0	1
Nut	4	1		0	0	0
Plate_1	2	0	0		1	1
Washer_2	3	0	0	1		0
Plate_2	2	1	0	1	0	



- 1/1: Berührung (ebener Kontakt)
- 2/0: Führung (zylindrische Beziehung)
- 3/3: Berührung + Führung
- 4/4: Fixierung (Schraubverbindung)

Bauteile	Nr.	Werkstoff	Masse [g]	Vol. [mm ³]	X _{max} [mm]	Y _{max} [mm]	Z _{max} [mm]
Bolt	1	1060 Legierung	5,59	2069,69	35	13	13
Washer_1	2	Graues Gusseisen	0,85	117,78	1,2	13,77	13,77
Nut	3	1060 Legierung	1,16	429,34	13	15,01	4
Plate_1	4	Unlegierter Baustahl	190,04	24363,83	50	10	50
Washer_2	5	Graues Gusseisen	0,85	117,78	1,2	13,77	13,77
Plate_2	6	Unlegierter Baustahl	190,04	24363,83	50	10	50

Abbildung 3.6 Systematisierung der extrahierten Features bei einem kombinierten Ansatz

In der dargestellten Nomenklatur erhalten ebene Kontakte die Kennzahl „1“. Falls zwei Bauteile die gleiche Achse eines Zylinders oder Kreises mit unterschiedlichen Richtungsvektoren teilen, kann eine Konzentrität erkannt werden. Ein positiver Vektor beschreibt damit einen Zylinder und ein negativer Vektor beschreibt eine Bohrung. Hierbei wird dem Zylinder aufgrund der Führungseigenschaft die Kennzahl „2“ zugeteilt, wohingegen die Bohrung die Kennzahl „0“ erhält. Dies geht darauf zurück, dass es tatsächlich zwischen den zwei Elementen zu keiner Berührung kommt und nur der Unterscheidung der Eigenschaften für die spätere Auswertung dient. Als Beispiel bei der

„bolt-nut plate fixing“ ist hierbei die Beziehung zwischen dem Bauteil „Bolt“ und den beiden Platten „Plate_1“ und „Plate_2“ zu nennen. Wenn zwei Komponenten eine Konzentrität und einen Kontakt aufweisen, wie es im Fall zwischen „Bolt“ und „Washer_2“ besteht, wird die Kennzahl „3“ vergeben. Wenn zwei Bauteile eine fixierende Verschraubung, aufgrund von Gewindefeatures, aufweisen, wie es beispielsweise der Fall zwischen „Bolt“ und „Nut“ ist, so wird die Kennzahl „4“ in der Matrix eingetragen. Falls keine Beziehung zwischen den Bauteilen erkannt werden kann, wird die Kennzahl „0“ vergeben. Weiterhin werden auch die extrahierten Bauteileigenschaften des kombinierten Ansatzes in Abbildung 3.6 dargestellt.

Zusammenfassend wird ersichtlich, dass ein kombinierter Ansatz aus einem Low-level Feature-Suchalgorithmus und einem ergänzenden Zugriff auf den Feature Manager der SolidWorks API alle notwendigen Informationen zur Spezifikation von Montageprozessen liefert. Weiterhin konnten auch Features über den Feature Manager identifiziert werden, die über Feature-Tools erzeugt wurden. So konnten sogar kosmetische Gewinde, die durch Gewinde-Feature-Tools erzeugt wurden, über das kombinierte Vorgehen gefunden werden. Eine Übersicht zu den unterschiedlichen Ansätzen findet sich in Abbildung 3.7. Damit konnte erstmals ein vollumfänglicher Ansatz ausgearbeitet werden, der es ermöglicht, sämtliche Informationen aus dem Stand der Technik in einem einzelnen System zu extrahieren. In einem nächsten Schritt müssen diese Montage-Features systematisiert und auf ihre beste Montagesequenz hin analysiert werden.

STEP AP203/214 (ISO 10303-203/214)	STEP AP242 (ISO 10303-242)	SolidWorks API (High-level Features)	SolidWorks API (Kombinierter Ansatz)
<input checked="" type="checkbox"/> Ebene Kontakte <input checked="" type="checkbox"/> Konzentritäten <input checked="" type="checkbox"/> Verschraubungen <input checked="" type="checkbox"/> CAD-Verknüpfungen <input checked="" type="checkbox"/> Bounding Box <input checked="" type="checkbox"/> Toleranzen <input checked="" type="checkbox"/> Gewicht <input checked="" type="checkbox"/> Material <input checked="" type="checkbox"/> Volumen	<input checked="" type="checkbox"/> Ebene Kontakte <input checked="" type="checkbox"/> Konzentritäten <input checked="" type="checkbox"/> Verschraubungen <input checked="" type="checkbox"/> CAD-Verknüpfungen <input checked="" type="checkbox"/> Bounding Box <input checked="" type="checkbox"/> Toleranzen <input checked="" type="checkbox"/> Gewicht <input checked="" type="checkbox"/> Material <input checked="" type="checkbox"/> Volumen	<input checked="" type="checkbox"/> Ebene Kontakte <input checked="" type="checkbox"/> Konzentritäten <input checked="" type="checkbox"/> Verschraubungen <input checked="" type="checkbox"/> CAD-Verknüpfungen <input checked="" type="checkbox"/> Bounding Box <input checked="" type="checkbox"/> Toleranzen <input checked="" type="checkbox"/> Gewicht <input checked="" type="checkbox"/> Material <input checked="" type="checkbox"/> Volumen	<input checked="" type="checkbox"/> Ebene Kontakte <input checked="" type="checkbox"/> Konzentritäten <input checked="" type="checkbox"/> Verschraubungen <input checked="" type="checkbox"/> CAD-Verknüpfungen <input checked="" type="checkbox"/> Bounding Box <input checked="" type="checkbox"/> Toleranzen <input checked="" type="checkbox"/> Gewicht <input checked="" type="checkbox"/> Material <input checked="" type="checkbox"/> Volumen

Abbildung 3.7 Übersicht unterschiedlicher Ansätze

3.2 Generierung von Montagesequenzen

Nachdem nun feststeht, wie die benötigten Informationen zur Montageplanung extrahiert werden, muss erprobt werden, wie mit diesen Informationen Montagesequenzen generiert werden können. Die beschriebenen Informationen basieren auf vorangegangenen Arbeiten der letzten 40 Jahre und aus eigenen grundlegenden Voranalysen. In den folgenden Untersuchungen wird sich zeigen, ob diese Informationen ausreichend sind, um valide Montagesequenzen zu generieren.

Die größte Herausforderung ist es, die Faktoren für eine Montagesequenzgenerierung aus Kapitel 2.1 in den Auswertungsprozess zu integrieren. Somit muss eine generierte Montagesequenz geometrisch ausführbar, stabil und nach Kriterien optimierbar sein. Die Anwendbarkeit der Optimierungskriterien, wie die Minimierung der Montagerichtungen, Montagepfade, Werkzeugwechsel, Montageaufgabenwechsel und Baugruppenstabilität, werden im Anschluss geprüft.

Modelliert wurden die extrahierten Kriterien als klassisches Wegfindungsproblem in Anlehnung an das beschriebene Konzept von Viganò et al. (2012) und Neb (2019). So wurde dieser vielversprechende Ansatz erweitert, sodass schon im Vorfeld unmögliche Montagesequenzen gefiltert werden. Mithilfe dieser graphischen Auswertung werden die Beziehungen zwischen den Bauteilen anhand der Assembly Features systematisiert. Basierend auf diesen Assembly Features in Form von Liaisons soll eine valide Montagesequenz generiert werden. Aus den 6 Bauteilen des Anwendungsfalls resultieren 720 Montagesequenzen, von denen die allermeisten nicht möglich sind. Viganò et al. (2012) haben ihren Ansatz auf 12 Montagesequenzen reduzieren können, allerdings ohne auf die reale Machbarkeit oder Sinnhaftigkeit der Montage einzugehen. Zur Behebung der beschriebenen Schwachstellen wurde die Kontaktmodellierung um einen regelbasierten Suchalgorithmus erweitert. Mithilfe der folgenden Regeln soll untersucht werden ob eine Ableitung von Montagesequenzen durch Kontaktkriterien ausreicht:

1. Kontaktkriterium: Der Einfluss der Assembly Features bestimmt die Montagesequenz
2. Geometrische Restriktionen: Bevor zwei Teile fixiert werden, müssen alle Komponenten, die sich zwischen den Teilen befinden, zuerst montiert werden
3. Baugruppenstabilität: Die mechanische Stabilität ist während der gesamten Montage verpflichtend
4. Montagestabilität: Wenn ein loses Bauteil fixiert werden kann, muss es im Folgeschritt fixiert werden

In Abbildung 3.8 sind alle elf identifizierten Assembly Features „bolt-nut plate fixing“ als Liaison-Graph dargestellt. Der Liaison-Graph ist hierbei die graphische Darstellungsform auf Basis der Assembly Features aus Abbildung 3.6. Die grünen Kreisflächen bzw. Knoten stellen die Bauteile dar, während die gerichteten Pfeile bzw. Kanten die Assembly Features visualisieren. So werden ebene Kontakte über schwarze, ungerichtete Pfeile dargestellt, während Konzentrität über orangene, gerichtete Pfeile dargestellt wird. Die gerichtete Darstellung hat hierbei den Hintergrund, dass bei einer Konzentrität zwischen dem führenden Element und den Bauteilen, die aufgesteckt werden, unterschieden wird. Verschraubungen werden mit grauen ungerichteten Pfeilen dargestellt.

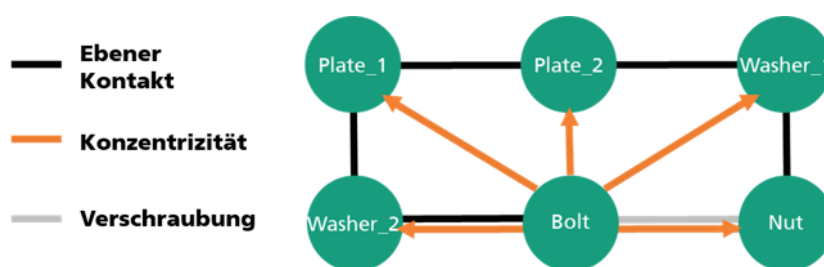


Abbildung 3.8 Liaison-Graph der „bolt-nut plate fixing“ in eigener Darstellung in Anlehnung an Neb (2019)

Der regelbasierte Suchalgorithmus folgt, wie im Konzept von Viganò et al. (2012) oder Neb (2019), dem Ansatz, dass nur zusammenhängende Teile ausgewählt werden können. Der Algorithmus beginnt mit der Auswahl des Basisbauteils und damit auch mit dem ersten Bauteil der Montage. Das Basisbauteil ist hierbei das Bauteil, das die meisten

Assembly Features und damit Beziehungen mit anderen Bauteilen aufweist. Die nachfolgenden Bauteile werden nach ihren Montageeigenschaften und den Montagevorschriften ausgewählt. Die Startkomponente der Baugruppe ist daher „Bolt“, da alle anderen Bauteile mindestens ein Assembly Feature damit teilen. Das anschließend zu montierende Bauteil wird durch das Assembly Feature mit dem höchsten Rang ausgewählt, sofern es nicht mit den Montagerregeln kollidiert. Damit wäre „Washer_2“ das zweite Bauteil der Montagesequenz, da „Nut“ zu einem Regelbruch führen würde. Anschließend würde der Algorithmus versuchen sich zu stabilisieren, indem das Bauteil mit einer Verschraubung fixiert wird. Hierfür müssen allerdings erst alle anderen Bauteile eingesetzt werden. Somit folgen „Plate_1“, „Plate_2“ und „Washer_1“ in der Montagesequenz bevor die Baugruppe stabil mit der „Nut“ fixiert wird.

Die detaillierten Assembly Features und die Modellierung in einem Liaison-Graphen sorgen dafür, dass die Montagesequenzen immer geometrisch ausführbar sind und die aufgestellten Montagerregeln für die entsprechende Stabilität sorgen. Allerdings stößt dieses Vorgehen schnell an Grenzen, sofern es Unterbaugruppen zur Montage bedarf. So war es nicht möglich, eine valide Montagesequenz aus dem Getriebe in Abbildung 3.9 zu generieren. Zur Montage eines Getriebes müssen zuerst die Wellen montiert werden, bevor diese ins Gehäuse eingesetzt werden. Eine Montage direkt im Gehäuse ist in den meisten Fällen weder empfehlenswert noch möglich. An dem Getriebe-Beispiel lässt sich zudem erkennen, dass eine lineare Montage zu Kollisionen zwischen den Zahnrädern führen würde und der Algorithmus versuchen würde, erst die Wälzlager und Sicherungsringe zu montieren, bevor er die Welle wählen würde. Grund für diese fehlerhafte Auswahl sind die definierten Kontaktkriterien und fehlende Montagerestriktionen. Mithilfe von Montagerestriktionen könnte erfasst werden, dass die logische Abfolge der Montage nicht direkt im Getriebe umgesetzt werden darf, sondern die Wellen in Unterbaugruppen vormontiert werden müssen.

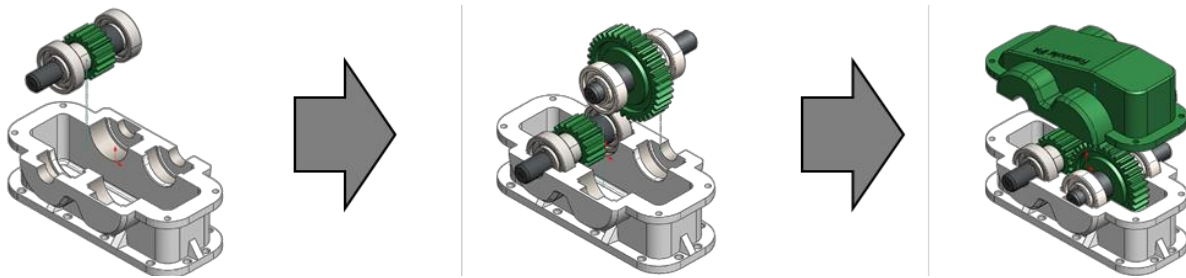


Abbildung 3.9 Montage von Wellen in einem Getriebe

Zudem zeigte sich, dass zwar die Stabilität der Baugruppe gewährleistet werden kann, jedoch keine weiteren Optimierungskriterien einbezogen werden können. So erfordert eine Minimierungsfunktion für Werkzeugwechsel zusätzliche Informationen zum benötigten Montagewerkzeug. Durch die ergänzende Identifikation von Normteilen auf Basis der Geometriefeatures könnte dies realisiert werden. So könnte beispielsweise schon zu Beginn bestimmt werden, dass, wenn es sich bei einem Bauteil um eine Senkschraube nach DIN EN ISO 10642 handelt, auch die Montagerichtung, die Montageart und das Werkzeug definiert werden können. Selbiges würde auch auf die Identifikation von genormten Muttern oder axialen Sicherungsringen zutreffen. Diese Informationen können zudem dazu genutzt werden, um neben dem Werkzeugwechsel auch die Montageaufgabenwechsel und Orientierungswechsel zu minimieren.

3.3 Fazit zum Konzept

Es wird ersichtlich, dass der Ansatz für eine Ableitung der Montagesequenzen um die Identifikation von Montagerestriktionen und Normteilen erweitert werden muss. Bei beiden Kriterien handelt es sich jedoch um Faktoren, die bisher noch nicht automatisiert aus 3D-Modellen extrahiert werden konnten. Wie im Stand der Technik in Kapitel 2.1.4.2 dargestellt, gibt es zwar schon erste Ansätze zur Bestimmung von genormten Bauteilen mithilfe einer KI (Briki 2019b; Neb et al. 2020b; Neb et al. 2020a), allerdings ist dieses Vorgehen sehr rechenintensiv, zeitaufwendig und nicht in der Lage, einem Normteil detailliert ein Montagewerkzeug zuzuweisen. Jedoch kann dieses Vorgehen durch den

gemischten Ansatz aus Kapitel 3.1.3 überbrückt werden, indem der Zugriff auf High-level Features mit einer Analyse von ausgewählten Low-level Features kombiniert wird. So wird zu Beginn im Feature-Manager nach Schraub- oder Gewinde-Features und im Anschluss gezielt nach den benötigten Form Features gesucht. Wenn beispielsweise eine Sechskant-Schraube identifiziert wird, kann direkt nach den sechs ebenen Flächen des Schraubkopfes gesucht werden. Sind schließlich die Abstände zwischen diesen ebenen Flächen bekannt, kann auch das benötigte Werkzeug ermittelt werden. Für die erste Erprobung dieses Vorgehens beschränkt sich diese Arbeit auf die gängige Normteile aus Abbildung 3.10.

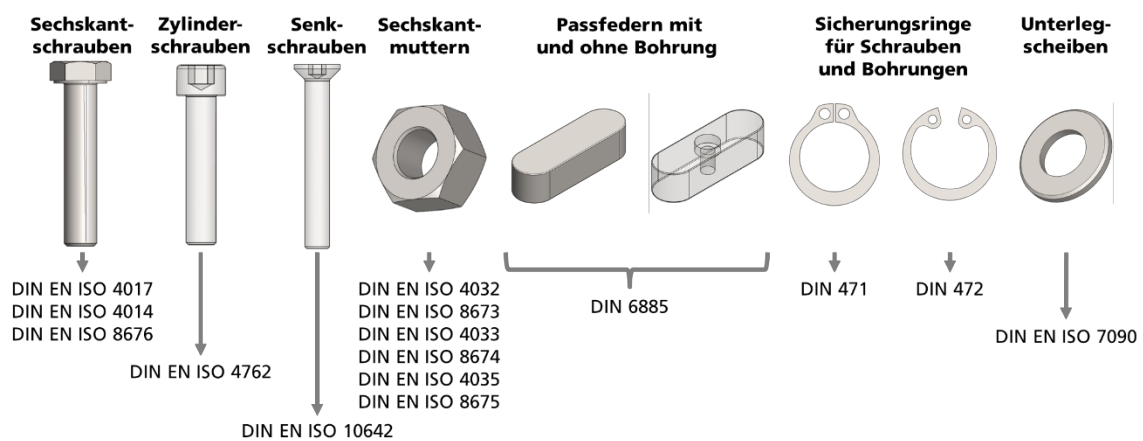


Abbildung 3.10 Im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Normteile

Weiterhin können durch die zusätzliche Ermittlung von Montagerestriktionen Einschränkungen zwischen den Bauteilen in Bezug auf deren Montagesequenz bestimmt werden. So würde eine beispielhafte Restriktion aus dem Getriebebeispiel in Abbildung 3.9 darauf hinweisen, dass das Zahnrad erst montiert werden kann, wenn die Passfeder montiert wurde, da es sonst zu Kollisionen kommen würde. Generiert werden diese Restriktionen über eine Kollisionsanalyse. Allerdings müssen diese nicht so umfangreich wie bei Thomas et al. (2003) durchgeführt werden, da durch die bekannten Assembly Features nicht alle $n!$ möglichen Szenarien durchgerechnet werden müssen. Zudem kann die Kollisionsanalyse durch die Kombination des featurebasierten Ansatzes ohne die Nachteile aus Kapitel 2.3.2 realisiert werden, da die Montagebeziehungen schon im Vorfeld bekannt sind und damit keiner manuellen Vor- oder Nacharbeit bedürfen.

4 Generierung von Montagesequenzen aus einem 3D-Modell

Basierend auf den formulierten Zielsetzungen in Kapitel 1.3 und den Erkenntnissen aus Kapitel 3 wird im Folgenden eine Methodik zur automatischen Generierung von Montagesequenzen aus einem 3D-Modell eines CAD-Systems vorgestellt. Hierbei orientiert sich das Vorgehen am klassischen Aufbau einer Methodik und an einem Zusammenspiel von Modell, Methode sowie den zugehörigen Hilfsmitteln (Heyn 1999). Abbildung 4.1 veranschaulicht diese Zusammenhänge. So ist das Modell ein abstraktes Abbild der Realität und es wird verwendet, um komplexe Sachverhalte, wie beispielsweise die Extraktion von Montageinformationen aus dem 3D-Modell, vereinfacht zu beschreiben. Daher wird in Kapitel 4.1 ein Modell erarbeitet, welches in den nachfolgenden Kapiteln spezifiziert wird. Die Methode hingegen dient der Gewinnung der Erkenntnisse. Zu guter Letzt lassen sich Hilfsmittel wie EDV-Werkzeuge als unterstützende Werkzeuge zur Realisierung definieren (Neuhausen 2001).

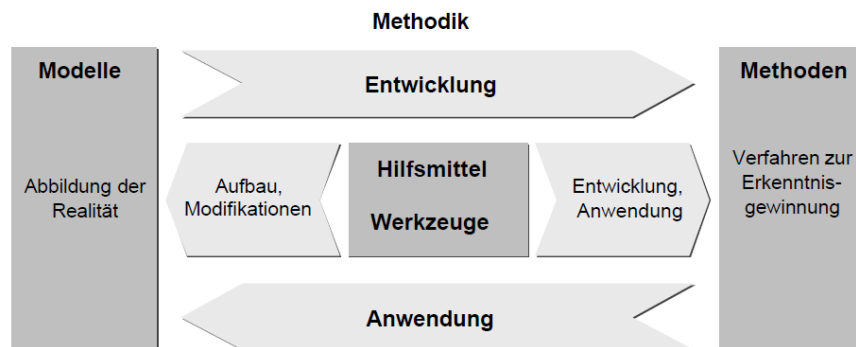


Abbildung 4.1 Aufbau einer Methodik in Anlehnung an Heyn (1999) (Neuhausen 2001)

4.1 Modell zur Beschreibung von Montageinformationen

Ziel dieses Kapitels ist die Beschreibung eines Vorgehens zur automatischen Generierung von Montagesequenzen. Die Beschreibung einer solchen Methode basiert auf einem System zielgerichteter Regeln und Annahmen (Hesse et al. 1992). Für eine Darstellung

dieser Vorgaben bieten sich Modelle an. Box et al. (1987) beschreiben Modelle mit den einfachen Worten: „*Im Grunde sind alle Modelle falsch aber einige sind nützlich*“. In der Tat beschreiben Modelle lediglich eine reduzierte Form der Realität und sie dienen der abstrakten Abbildung eines ausgewählten Teils einer „*existierenden oder einer noch zu schaffenden Realität*“, so Pohl et al. (2021).

Für die Darstellung des Modells eignen sich Informationsmodelle in besonderem Maße. Informationsmodelle kommen aus der Informationstechnik und stellen abstrahierte Beziehungen und Eigenschaften von ausgewählten Objekten dar. Hierzu werden von Einzelpersonen oder Gruppen benötigte Informationen in strukturierter Form ermittelt, um in einer konkreten Situation das benötigte Wissen zu übergeben (IEC 2019).

4.1.1 Definition des Montageplanungsmodells

Zur Sicherstellung, dass unterschiedliche Unternehmen oder Individuen die vorliegenden Informationen für eine Problemstellung gleichermaßen verstehen und interpretieren, ist die strukturierte Aufbereitung der Informationen in einem spezifischen Kontext inklusive der benötigten Interpretationsregeln notwendig. Für die vorteilhafte Modellierung ist es daher zwingend erforderlich, zu spezifizieren, wie Informationen effizient ausgetauscht und fehlerfrei interpretiert werden können. Daher werden Regeln und Strukturen definiert, die eine mehrdeutige Interpretation ausschließen und ein fehlerhaftes Auslesen minimieren.

Weiterhin müssen Maschinen diese Informationen verarbeiten können. Maschinen gebrauchen Informationen durch die Anwendung von Daten- und Informationsmodellen und sind nicht in der Lage, menschliche Kontextwahrnehmungen zu interpretieren (IEC 2019). Daher muss es das Ziel sein, durch Kapselung des expliziten Wissens

Informationsmodelle so aufzubauen, dass ein Wissenstransfer zwischen der realen Problemstellung und den Maschinen ermöglicht wird (IEC 2019).

Zur Entwicklung eines entsprechenden Montageplanungsmodells muss zu Beginn eine passende Modellierungsmethode identifiziert werden. Hierzu müssen zunächst montagerelevante Anforderungen an die Modellierungsmethode abgeleitet werden. Auf Basis dieser Anforderungen wird schließlich die Modellierungsmethode ausgewählt. So muss die Modellierungsmethode zu jedem Zeitpunkt die Konsistenz, Eindeutigkeit und Vollständigkeit des Montageplanungsmodells gewährleisten. Weiterhin muss das Modell in der Lage sein, folgende Daten und Informationen zu repräsentieren:

- Bauteile: Anzahl und Name der Bauteile
- Unterbaugruppe: Gruppierung von Bauteilen für eine benötigte Vormontage
- Normteile: Bauteilnormen und genormte Eigenschaften
- Werkzeug: Benötigtes Montagewerkzeug
- Montagebeziehungen (Assembly Features): Art der Montage
- Montagerestriktionen: Montageabhängigkeiten zwischen den Bauteilen
- Montagerichtungen: Füge-richtung des zu montierenden Bauteils
- Bauteileigenschaften: Farbe, Material, Volumen, Gewicht, Bounding Box
- Schwerkraftrichtung: Einflussgröße der Stabilitätsbetrachtungen

Zur Auswahl der passenden Modellierungsmethode und Abstraktion des Originals werden die drei Hauptmerkmale eines Modells nach Stachowiak (1973) herangezogen. Das *Abbildungsmerkmal* besagt, dass ein Modell ein Abbild eines realen Systems ist und damit eine Repräsentation der abgebildeten Realität oder auch künstlicher Originale, die selbst wiederum Modelle sein können (Stachowiak 1973). Das *Verkürzungsmerkmal* hingegen beschreibt, dass ein Modell eine Vereinfachung der abgebildeten Realität des Originals ist und damit auch nicht alle enthaltenen Attribute wiedergibt, sondern nur diejenigen, welche für den Modellerschaffer oder -nutzer auch als relevant erscheinen (Stachowiak

1973). Das dritte Merkmal ist das *pragmatische Merkmal*. Dieses Merkmal beschreibt, dass Modelle ziel- und zweckorientiert sind und damit eine pragmatische Auswahl der Attribute der dargestellten Realität wiedergeben (Stachowiak 1973). Nach diesem Merkmal sind Modelle ihrem Original nicht per se eindeutig zuzuordnen und sie erfüllen daher ihre Ersetzungsfunktion lediglich für bestimmte Schwerpunkte und unter bestimmten Einschränkungen (Stachowiak 1973).

Weiterhin definiert Patzak (1982) mit Ergänzungen von Foith-Förster et al. (2019) die Eigenschaften eines guten Modells. So kann ein Modell als geeignet deklariert werden, wenn es folgende Eigenschaften erfüllt:

- Realistisch: Modell muss empirisch richtig sein und das Original „korrekt“ abbilden
- Formal korrekt: Modell muss frei von Widersprüchen und repetierbar sein
- Zweckorientiert: Modell muss leicht anwendbar sein und Möglichkeiten der Integration in Methoden bieten
- Praktikabel mit geringem Aufwand: Effiziente Modellierung ohne unnötige Inhalte; schon mit geringen Vorkenntnissen intuitiv und schnell interpretierbar

Anhand dieser Vorgaben kann ein Modell erstellt werden, allerdings bedarf es hierzu noch einer geeigneten Modellierungsmethode und Notation. So sind formale Notationen notwendig, um die Realität mit einem Modell beschreiben zu können (Ropohl 2009). Zur Modellierung einer Montage bzw. Montageplanung ist daher auch eine passende Notation zu wählen. Hierbei sollen auch die Erkenntnisse aus angrenzenden Arbeiten, wie beispielsweise von Kärcher et al. (2019), Foith-Förster et al. (2019) oder Fechter (2021), berücksichtigt werden. Aufgrund der hohen Anzahl an Auswahlmöglichkeiten systematisierte Specker (2005) diese in einer Modellierungsmatrix nach den Aspekten Prozess, Funktion, Objekt und Aufgabe. Diese Unterteilung wurde von Foith-Förster et al. (2019) schließlich noch um passende Modellierungsmethoden erweitert (siehe Abbildung 4.2) und dient dieser Arbeit als Grundlage zur Auswahl der Modellierungsmethode. Die

abgebildete Modellnotationsmatrix ist hierbei so aufgebaut, dass zwei Modellierungsaspekte in die Auswahl einbezogen werden.

primary \ secondary	Process	Function	Object	Task
Process	<ul style="list-style-type: none"> • IDEF2 • ARIS business model <p>Process model</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ARIS function sequence 	<ul style="list-style-type: none"> • UML State-Machine-Diagram • SysML State-Diagram • IDEF3 Object State transition diagram • IDEF 4 State Diagram 	<ul style="list-style-type: none"> • Taskoriented Information flow
Function	<ul style="list-style-type: none"> • UML Activity diagram • SysML Activity diagram • IDEF3 Process Flow • EK(ARIS) • PAPDIN66001 • Petri net • FFBD, EFFBD • SA/SD Dataflow diagramm <p>Functions model</p>	<ul style="list-style-type: none"> • IDEF0 • ARIS functions structure* • Functions structure diagram* 	<ul style="list-style-type: none"> • IDEF4 Client/Server Diagram 	
Object	<ul style="list-style-type: none"> • UML Sequence Diagram • UML Timing diagram • UML Interaction Overview • SysML Sequence Diagram • AD Flow diagram • Precedence Graph* • Precedence Matrix* 	<ul style="list-style-type: none"> • IDEF 4 Behavior Diagram • AD FR/DP/PV Hierarchies* 	<ul style="list-style-type: none"> • UML* Class-, Object, Package, Composite Structure, Profile-, Componentdiagramm • SysML Block definitions-, Package-, Internal Block-, Requirement-, Parametric diagram • AD Module Junction Diagram* • IDEF4 Class Instance-, Relation-, Link & Instance Link Diagram • IDEF 1x* • Express Express G* • ARIS ERM • BOM* • ER / EER • Variant-Tree* <p>Object model</p>	
Task	<ul style="list-style-type: none"> • MTO workflow diagram • BPMN • UML & SysML Activity Diagram (with responsibilities) • Value Stream Mapping and Design 	<ul style="list-style-type: none"> • UML / SysML Use-Case Diagram • ARIS Functions-Organisation-diagram • SA/SD Contextdiagram 	<ul style="list-style-type: none"> • UML Communication diagram 	<ul style="list-style-type: none"> • MTO Organisation Model • ARIS Organisation Structure <p>Organization model</p>

Abbildung 4.2 Modellnotationsmatrix (Foith-Förster et al. 2019)

Zur Auswahl einer passenden Notation aus der Matrix in Abbildung 4.2 werden spezifische Anforderungen verglichen. So muss die Notation die oben aufgeführten Systemkomponenten darstellen können und in der Lage sein, die unterschiedlichen Klassen der Prozessbauteile zu modellieren. Weiterhin muss es möglich sein, die Elemente hierarchisch in Subsysteme zerlegen zu können und mögliche Beziehungen zwischen den Objekten so anzufertigen, dass diese die Struktur der Montage abbilden.

Basierend auf diesen zusätzlichen nicht-funktionalen Anforderungen wurde die Objektsicht aufgrund der Verarbeitungseigenschaften der Elemente gewählt, da die

Verknüpfungen der Elemente im Mittelpunkt der Modellierung stehen. Weiterhin zeigt sich, dass besonders die Modellierungssprache Unified Modeling Language (UML) für diese Zwecke geeignet ist (Foith-Förster et al. 2019) und sich bereits als erfolgreicher Standard dieses Segments etablierte (Kärcher et al. 2019). UML ist hierbei eine graphische Modellierungssprache mit einem besonderen Augenmerk auf der visuellen Spezifikation, Konstruktion und Dokumentation und wird von der Object Management Group (OMG) gepflegt und weiterentwickelt (Booch et al. 2005). Durch die vorteilhaften graphischen Notationen der UML können neben den statischen Strukturen auch dynamische Abläufe modelliert werden, sodass sich die Strukturen diese Modellierungssprache auch zu einem Standard in der Softwaresystem-Modellierung etablierten.

4.1.2 Aufbau des Modells

Wie in Kapitel 3 erarbeitet wurde, bietet ein interner Ansatz über eine API-Schnittstelle und ein kombiniertes Vorgehen aus Feature-Extraktion und featurebasierter Kollisionsanalyse den vielversprechendsten Lösungsansatz. Ergänzt werden diese Informationen über die direkte Extraktion der Bauteileigenschaften auf Basis von textuell hinterlegten Informationen, wie Material und Gewicht, um zu einem präziseren Resultat zu gelangen. Abbildung 4.3 veranschaulicht dieses Vorgehen. So dient die CAD-API als Schnittstelle zu dem 3D-Modell im CAD-System sowie den drei untersuchten Extraktionen. Anschließend werden diese Informationen systematisiert und aufbereitet. Das Resultat ist eine Vielzahl an potenziellen, nicht näher spezifizierten Montagesequenzen. Auch wenn diese Montagesequenzen durch die Bindung der Assembly Features und der damit verbundenen Liaisons zum großen Teil vorgefiltert werden konnten, findet sich hierin noch eine Vielzahl an unvorteilhaften Montagesequenzen. Zur Ableitung von optimierten Montagesequenzen bedarf es daher Optimierungs- bzw. Bewertungskriterien. Diese werden in Kapitel 4.4 näher spezifiziert und angewandt. Zur Präzisierung des ausgearbeiteten Vorgehens wird auf Basis der in Kapitel 4.1.1 identifizierten Modellierungsmethode ein Modell zur Beschreibung von Montageinformationen erstellt.

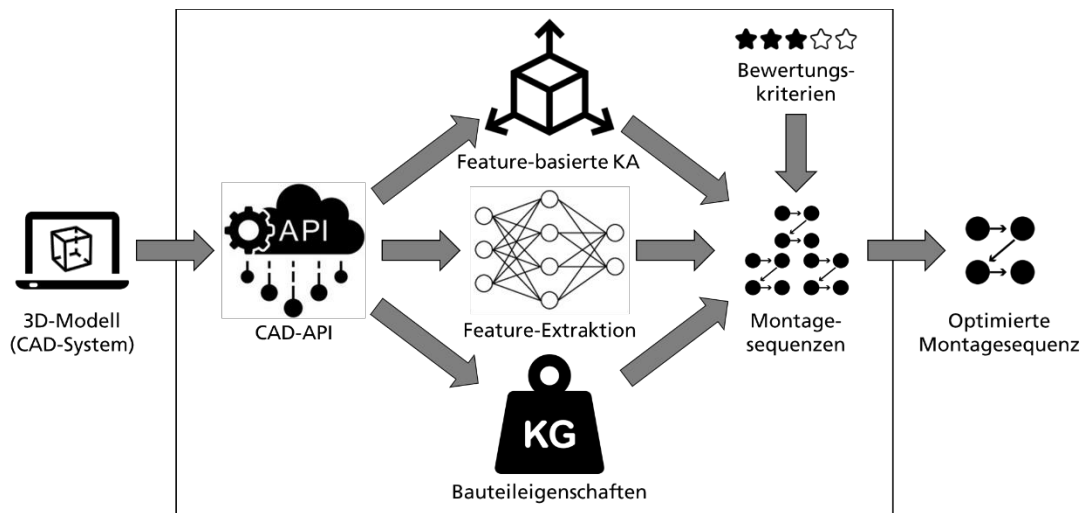


Abbildung 4.3 Verfolgter Ansatz zur automatischen Generierung von Montagesequenzen aus einem 3D-Modell

Zentrale Anforderungen an das Modell sind die einfache Erweiterbarkeit sowie Detaillierung. Daher wurde für die Entwicklung eines Montageplanungsmodells das UML Klassendiagramm genutzt. Dieses ermöglicht eine einheitliche Beschreibung des Systemaufbaus sowie der damit verbundenen Einflussgrößen, Abhängigkeiten und Zusammenhänge. Unter Berücksichtigung des Abbildungsmerkmals werden sämtliche relevanten Informationen zur Planung einer optimierten Montagesequenz dargestellt. Das Verkürzungsmerkmal reduziert hierbei die Komplexität auf den gewählten Detaillierungsgrad, um die Zusammenhänge trotz der großen Anzahl an Montageinformationen einfach zu beschreiben. Zu guter Letzt konzentriert sich das pragmatische Merkmal auf die konkrete Handlungsabsicht der Montagesequenzbildung.

Auf Basis der gewählten Modellierungsmethode ist in Abbildung 4.4 das Montageplanungsmodell veranschaulicht. Die Klassen des Modells geben hierbei einen Überblick über die Struktur und werden im Folgenden genauer thematisiert:

Die Klasse „3D-Modell (natives Format)“ beinhaltet die Attribute „NameBaugruppe“, „NameBauteile“ und „AnzahlBauteile“. Über diese Attribute können die Bauteile beschrieben und identifiziert werden. Weiterhin muss das 3D-Modell in dem CAD-System-

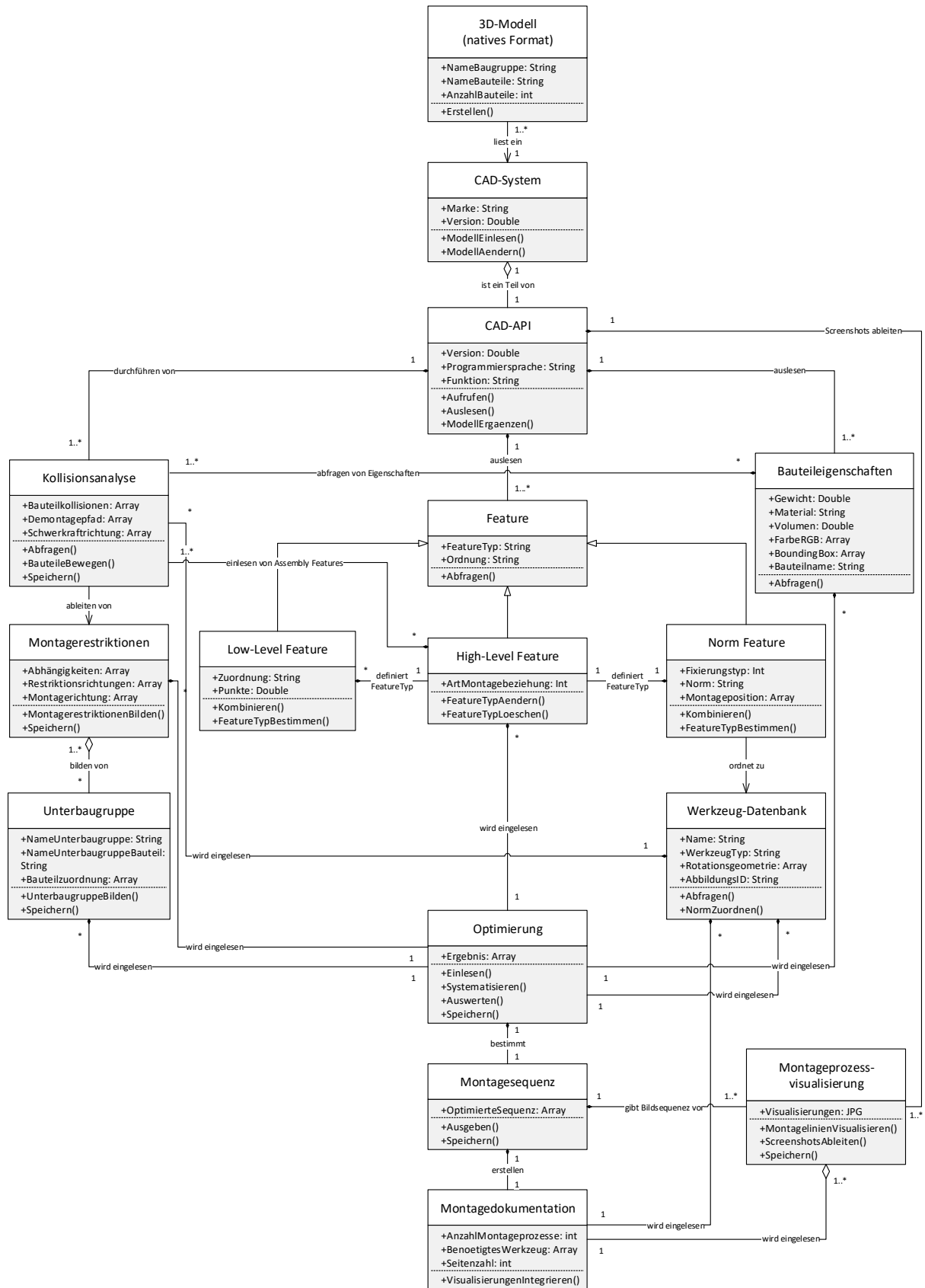


Abbildung 4.4 UML-Modell zur Beschreibung von Montageinformationen

spezifischen, nativen Datenformat vorliegen. Nur auf diese Weise kann eine ausreichende Datenbasisuntersuchung gewährleistet werden. „Erstellen()“ definiert den Prozess der Modellerstellung und findet sich in dem Aufbau des Modells wieder.

Die Klasse „CAD-System“ beschreibt das verwendete CAD-System, da sich diese Systeme grundlegend voneinander unterscheiden. So muss über die Attribute „Marke“ und „Version“ spezifiziert werden, um welche CAD-Software es sich genau handelt. „ModellEinlesen()“ und „ModellAendern()“ behandeln hierbei die Interaktionen mit dem 3D-Modell.

Das Ziel der Klasse „CAD-API“ ist der Zugriff auf das CAD-System und damit auf sämtliche Informationen des 3D-Modells. Das Attribut „Version“ beschreibt die Auflage der CAD-API und damit die vorhandenen Befehle und Umfänge. Die „Programmiersprache“ beschreibt zudem, mit welcher Sprache die Inhalte abgefragt werden können. Am Schluss beschreibt das Attribut „Funktion“ die verfügbaren Funktionsumfänge. Über die Methoden „Aufrufen()“ und „Auslesen()“ können die einzelnen Modelle der Baugruppe und Bauteile aufgerufen und ausgelesen werden. Allerdings können die Modelle mit der Methode „ModellErgaenzen()“ um Inhalte wie Montagelinien erweitert werden.

Die Klasse „Feature“ kann in die drei Klassen „Norm Feature“, „Low-level Feature“ und „High-level Feature“ unterteilt werden. Hierbei werden die Attribute „FeatureTyp“ und „Ordnung“ an alle Klassen vererbt und beschreiben die Art der Features. „Abfragen()“ ermöglicht das Auslesen und Abfragen der Features über die CAD-API.

Der Fokus der „Norm Feature“-Klasse ist die Beschreibung genormter Bauteile der Baugruppe, insbesondere die Fixierungen. So kann mithilfe der Attribute „Fixierungstyp“ und „Norm“ die Art der Fixierung beschrieben werden. Weiterhin wird mittels des Attributes „Montageposition“ auch die Endmontageposition abgeleitet und beschrieben.

Dies kann durch die Methoden „Kombinieren()“ und „FeatureTypBestimmen()“ realisiert werden. Über die Klasse „Werkzeug-Datenbank“ können die identifizierten Normteile bzw. Montageprozesse einem Montagewerkzeug zugeordnet werden. Diese werden über die Attribute „Name“ und „WerkzeugTyp“ definiert. Des Weiteren kann durch das Attribut „Rotationsgeometrie“ ein dreidimensionales Rotationsmodell des Montagewerkzeugs der Klasse „Kollisionsanalyse“ zur Verfügung gestellt werden. Mithilfe dessen können die Erreichbarkeiten der Montagewerkzeuge überprüft werden und in der Generierung der Montagesequenz betrachtet werden. Über das Attribut „AbbildungsID“ kann weiterhin auch eine symbolische Abbildung des Montagewerkzeugs an die Klasse „Montagedokumentation“ weitergegeben werden. Über die Methoden „Abfragen()“ und „NormZuordnen()“ können diese Attribute ermittelt und spezifiziert werden.

Die Klasse „Low-level Feature“ definiert die kleinste Form der Features. Über die Attribute „Zuordnung“ und „Punkte“ können diese spezifiziert werden. Anhand der Methoden „Kombinieren()“ und „FeatureTypBestimmen()“ können diese Low-level Features zu höherwertigen Features kombiniert werden und zu weiteren Featuretypen führen. Die Klasse „High-level Feature“ beinhaltet die höherklassigen Features und damit auch die Assembly Features, die über das Attribut „ArtMontagebeziehung“ definiert werden. Durch die Methoden „FeatureTypAendern()“ und „FeatureTypLoeschen()“ können die extrahierten High-level Features um die kombinierten Low-level Features und Norm Features angepasst oder berichtigt werden.

Die Klasse „Kollisionsanalyse“ kann durch einen Zugriff auf die CAD-API eine systematische Kollisionsanalyse der einzelnen Bauteile der Baugruppe durchführen. Hierbei beschreibt das Attribut „Bauteilkollisionen“ die Kontakte sämtlicher Bauteile in ihren jeweiligen Koordinatensystemen. Über das Attribut „Demontagepfad“ wird über den Demontagepfad der Montagepfad der Kollisionsanalyse ermittelt. Ergänzend werden durch das Attribut „Schwerkraftrichtung“ die jeweiligen Szenarien für die

unterschiedlichen Schwerkraftrichtungen der Koordinatenachsen beschrieben. Mittels der Methoden „Abfragen()“, „BauteileBewegen()“ und „Speichern()“ werden die dazu benötigten Informationen generiert und gespeichert.

Die Klasse „Montagerestriktionen“ leitet sich aus der Kollisionsanalyse ab. Hierbei werden die Restriktionen über die Attribute „Abhängigkeiten“, „Restriktionsrichtungen“ und „Montagerichtung“ gebildet. Über die Methoden „MontagerestriktionenBilden()“ und „Speichern()“ werden die relevanten Informationen generiert und gespeichert. Die Klasse „Unterbaugruppe“ bildet sich aus der Klasse der „Montagerestriktionen“. Über die gezielte Abfrage der relevanten Restriktionen können Erkenntnisse zu den Unterbaugruppen generiert werden. Durch die Attribute „NameUnterbaugruppe“, „NameUnterbaugruppeBauteile“ und „Bauteilzuordnung“ werden die Unterbaugruppen spezifiziert und beschrieben. Mit Hilfe der Methoden „UnterbaugruppeBilden()“ und „Speichern()“ können die Unterbaugruppen gebildet und gespeichert werden.

Die Klasse „Optimierung“ führt auf Basis eingelesener Informationen die Optimierungsmethoden aus und bestimmt daraus die optimierte Montagesequenz in der Klasse „Montagesequenz“. Diese wird mit dem Attribut „OptimierteSequenz“ beschrieben und mithilfe der Methoden „Ausgeben()“ und „Speichern()“ ausgegeben.

Die Klasse „Montageprozessvisualisierung“ liest die Montagesequenz aus und bestimmt auf Basis dieser die Bildsequenz, in welcher die Visualisierung aus dem CAD-Modell mithilfe der CAD-API und des CAD-Systems generiert werden soll. Über die Methode „MontagelinienVisualisieren()“ werden Montagelinien in den 3D-Modellen hinterlegt und veranschaulicht. Anschließend werden mit der Methode „ScreenshotsAbleiten()“ die Screenshots bzw. 2D-Bilder extrahiert und in die Klasse „Montagedokumentation“ weitergegeben. Diese beinhaltet die Visualisierung der Ergebnisse in einer Dokumentation. So werden über die Attribute „AnzahlMontageprozesse“,

„BenoetigtesWerkzeug“ und „Seitenzahl“ die relevanten Informationen beschrieben und kommuniziert. Mithilfe der Methode „VisualisierungenIntegrieren()“ werden die benötigten Visualisierungen an die relevante Stelle integriert.

4.2 Featurebasierte Modellanalyse

Wie schon der Stand der Technik aufzeigte und in Kapitel 3 herausgearbeitet wurde, bietet nur das native Datenformat eines CAD-Systems eine ausreichende Informationsgrundlage für eine ausführliche Untersuchung. Daher wurde die verbreitetste CAD-Software SolidWorks für die weitere Arbeit ausgewählt.

4.2.1 Datenextraktion aus dem CAD-Modell

Basierend auf der flächendeckenden Verbreitung von SolidWorks und dessen ausgeprägten Anwendungsmöglichkeiten wird das native Format *.sldasm für die weitere Entwicklung verwendet. Zugegriffen wird auf das 3D-Modell mithilfe der SolidWorks API. So kann der Funktionsumfang von SolidWorks über die CAD-Schnittstelle erweitert werden und auch interne Funktionen können angepasst werden. Für die Nutzung dieser Inhalte ist ein Zugriff auf die API Interfaces erforderlich. Die Interfaces sind hierbei hierarchisch untergliedert (Abbildung 4.5) und jedes Interface bietet einen Zugriff auf einen anderen Funktions- und Informationsumfang des 3D-Modells. So wird ersichtlich, dass zur Nutzung zuerst SolidWorks über „SldWorks“ aufgerufen werden muss, bevor auf die Modelltypen über das Interface „ModelDoc2“ zugegriffen werden kann. Im Anschluss können baugruppenspezifische Funktionen über „AssemblyDoc“ aufgerufen werden oder bauteilspezifische Funktionen über „PartDoc“ erlangt werden. In den jeweiligen Zugriffsbereichen können wiederum zunehmend spezifische Informationen und Werte abgefragt, ergänzt und bearbeitet werden. Ein weiteres essenzielles Interface ist der „FeatureManager“. Mithilfe dessen können Features einer höheren Ordnung wie die benötigten Assembly Features direkt abgefragt werden.

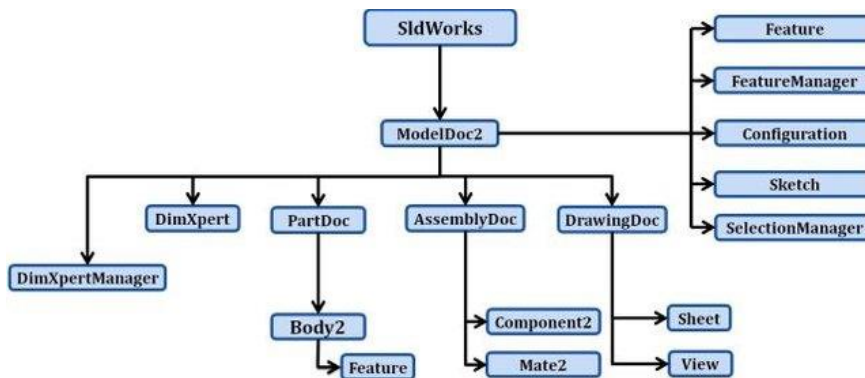


Abbildung 4.5 Objektmodell der SolidWorks API Interfaces (Hasan et al. 2016b)

4.2.2 Bestimmung von Bauteileigenschaften

Wie schon das Modell zur Beschreibung von Montageinformationen in Abbildung 4.4 veranschaulicht, sind Bauteileigenschaften essenziell bei einer präzisen Ableitung der Montagesequenzen. So werden diese Informationen bei der Kollisionsanalyse und der Optimierung der Montagesequenzen benötigt. Zu den benötigten Eigenschaften gehören neben den Baugruppen- und Bauteilnamen auch das Volumen, Gewicht und Material. Die Implementierung der zugehörigen Extraktionsfunktion findet sich im Anhang 9.3.1.

Neben den Bauteileigenschaften spielt allerdings auch die Bounding Box als bauteilspezifische Eigenschaft eine essenzielle Rolle. Die Bounding Box ist die kleinstmögliche Box in einem vordefinierten Koordinatensystem, die ein Bauteil mit seinen Außenmaßen ausfüllt. Diese Box ist ein elementarer Bestandteil der weiteren Planung und wird in nahezu jedem weiteren Optimierungsschritt abgefragt. Ermittelt wird die Bounding Box analog zu der Ermittlung der Materialeigenschaften. Die Gefahr dieses Vorgehens ist allerdings die Abhängigkeit der Bounding Box von der Bauteillage im eigenen Koordinatensystem. Abbildung 4.6 veranschaulicht hierbei ein fehlerhaftes Szenario. So wird erkenntlich, dass die Dimensionen der Bounding Box (x_{min} , x_{max} , y_{min} , y_{max} , z_{min} , z_{max}) von der Ausrichtung der Bauteile abhängen. Zwar entspricht das Beispiel zur Rechten nicht den Standards einer adäquaten Konstruktion, dennoch besteht die Gefahr, dass fehlerhafte Konstruktionen falsch erkannt werden.

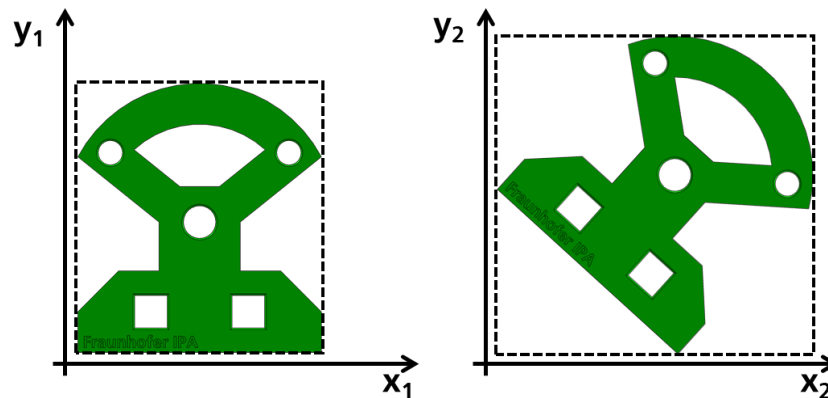


Abbildung 4.6 Gefahren bei der automatischen Generierung von Bounding Boxes

4.2.3 Bestimmung von Assembly Features

Der Kern der Arbeit ist die featurebasierte Planung der Montagesequenzen. Hierfür müssen verschiedene Typen von Features mit unterschiedlichen Ordnungen charakterisiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf den gängigsten Assembly Features aus der Konstruktion. Abbildung 4.7 veranschaulicht die verfügbaren Standardverknüpfungen in SolidWorks 2019, die Anwender nutzen können. Die Verknüpfungen „Parallel“ und „Sperren“ gehören allerdings nicht zu den Assembly Features, da diese lediglich eine Konstruktionshilfe darstellen und keinen Einfluss auf die Montage der Baugruppe haben. So lassen sich, abgesehen von der konzentrischen Verknüpfung, sämtliche Verknüpfungen der Kategorie der kontaktbasierten Assembly Features zuteilen.

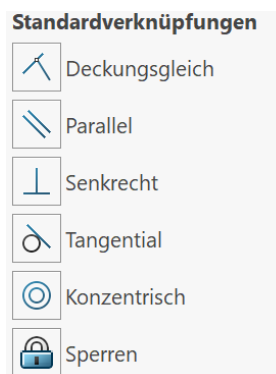


Abbildung 4.7 Standardverknüpfungen in SolidWorks 2019

Wie sich schon in Kapitel 3 herausstellte, ist der sicherste Ansatz, höherrangige Features zu generieren, diese aus niederrangigen Features, den sogenannten Low-level Features, zu gewinnen. So kann ein Assembly Feature geometrisch zwischen zwei Bauteilen ermittelt werden, sofern diese zwei Bauteile beispielsweise eine gemeinsame Fläche aufweisen. Über einen Abgleich der Geometrien können, völlig unbeeinflusst von den konstruierten Verknüpfungen, von einfachen, formlosen Koordinatenpunkten, bis hin zu Flächen, Achsen und Vektoren die Features miteinander verglichen und gezielt analysiert werden. Dazu muss jedes Bauteil einzeln ausgelesen und analysiert werden, um die gewonnenen Informationen anschließend mit den anderen Bauteilen abzugleichen.

Durch die Systematisierung dieser geometrischen Informationen in Arrays und Matrizen können diese für die nachfolgenden Informationsabfragen aufbereitet werden. Bevor Geometrien, Flächen oder Parameter allerdings miteinander verglichen werden können, müssen diese in ein gemeinsames Koordinatensystem gebracht werden. Das Koordinatensystem der gesamten Baugruppe dient hierzu als Referenz. Daher müssen vor Beginn der Analyse erst alle Bezugssysteme vereinheitlicht werden. Dies ist über eine vorgelagerte Koordinatentransformation sämtlicher Bauteile möglich (Abbildung 4.8).

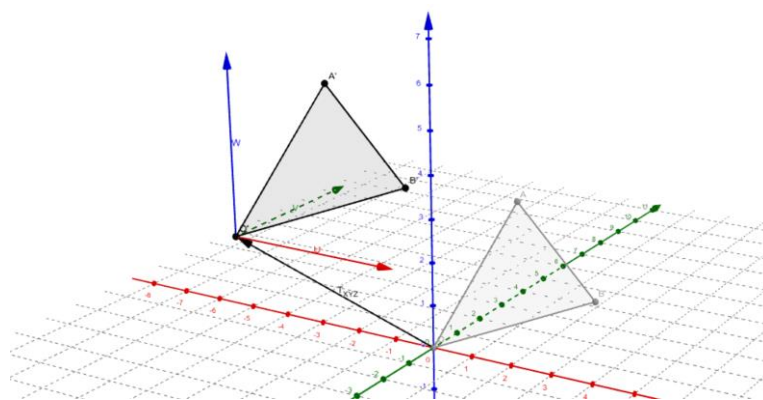


Abbildung 4.8 Symbolisches Vorgehen einer Koordinatentransformation (GeoGebra 2021)

Nachdem alle Bauteile vereinheitlicht wurden, muss die Geometrie der Bauteile analysiert und miteinander abgeglichen werden, sodass wiederum Assembly Features daraus

identifiziert werden können. Unterschieden werden hierzu flächige Kontakte, zylindrische Kontakte und tangentielle Kontakte. Abbildung 4.9 veranschaulicht hierzu die extrahierten Arten der Assembly Features. Ergänzend dazu finden sich im Anhang 9.3.2 die implementierten Funktionen zu ihrer Extraktion aus dem 3D-Modell.

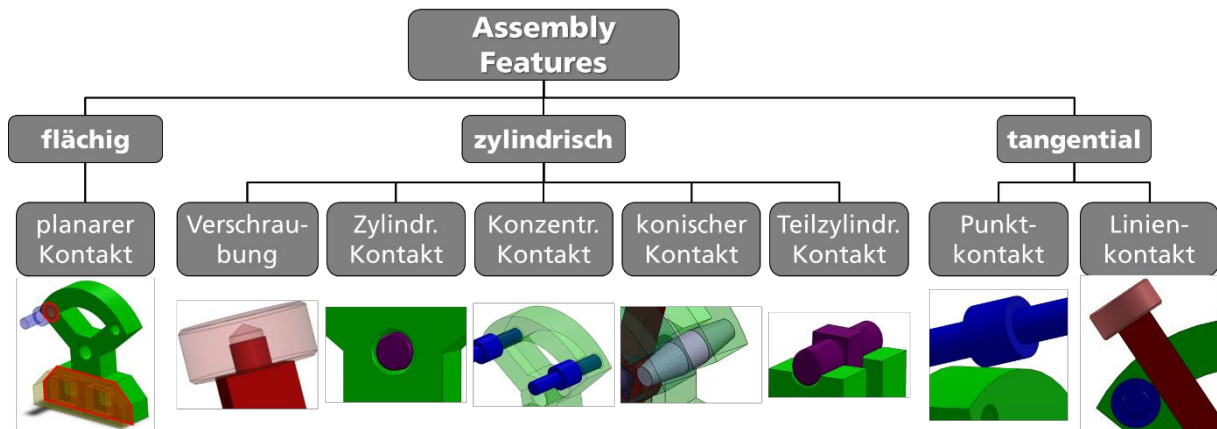


Abbildung 4.9 Untersuchte Assembly Features

4.2.4 Bestimmung von Normteilen

Anders als in vorangegangenen Arbeiten soll der vorgestellte Ansatz die montagerelevanten Informationen ausschließlich aus dem 3D-Modell des CAD-Systems extrahieren. Normteile stellen hierzu, wie in Kapitel 3 herausgearbeitet wurde, einen essenziellen Bestandteil dar, der sich von allen bisherigen Lösungsansätzen abhebt. Daher wurde ein Vorgehen entwickelt, welches es ermöglicht, aus einem CAD-System sämtliche benötigten Normteilm Informationen zu extrahieren. Ergänzend dazu wird im Rahmen dieser Arbeit auch die Zugänglichkeit für Werkzeuge untersucht.

Tabelle 4.1 veranschaulicht hierbei die untersuchten Elemente mit deren Norm sowie ihren Merkmalsausprägungen. Die Klassifikation kann damit gelöst werden, dass in den Normteilen nach spezifischen Merkmalsausprägungen gesucht wird. Hierbei beschränkt sich die Auswahl der Normteile auf die „Toolbox“ von SolidWorks. Diese CAD-interne

Bibliothek ist eine Hilfe für Konstrukteurinnen und Konstrukteure. Mit ihr können Normteile wie Schrauben oder Muttern in den zugelassenen Größen konfiguriert und direkt in das 3D-Modell eingebunden werden. Der Zugriff auf die „Toolbox“ und damit auf die enthaltenen Normteile erfolgt über die Funktion „ToolboxPartType“. Bei einer positiven Identifikation eines Normteils erfolgt eine weitere Prüfung über die Konfiguration der Norm. Über eine Suchfunktion können schließlich die Informationen ausgelesen werden. Wenn beispielsweise die Norm DIN EN ISO 10642 identifiziert wird, so können auch die Gewindelänge und der Durchmesser ausgelesen werden.

Tabelle 4.1 Extrahierte Normteile und Merkmalsausprägungen

Symbolbild	Normteil	Norm	Merkmalsausprägungen
	Sechskantschraube	DIN EN ISO 4017	<ul style="list-style-type: none"> • Durchmesser • Gewindelänge • Schlüsselweite / Werkzeuggröße
	Zylinderschraube	DIN EN ISO 4014	
	Senkschraube	DIN EN ISO 8676	
		DIN EN ISO 4762	
	Sechskantmutter	DIN EN ISO 4032	<ul style="list-style-type: none"> • Schlüsselweite • Durchmesser • Mutternhöhe
		DIN EN ISO 8673	
		DIN EN ISO 4033	
		DIN EN ISO 8674	
		DIN EN ISO 4035	
		DIN EN ISO 8675	
	Passfeder	DIN 6885	<ul style="list-style-type: none"> • Höhe • Breite • Länge
	Sicherungsringe	DIN 471	<ul style="list-style-type: none"> • Durchmesser • Dicke
		DIN 472	
	Unterlegscheibe	DIN EN ISO 7090	<ul style="list-style-type: none"> • Durchmesser • Dicke

Alle weiteren Merkmalsausprägungen aus Tabelle 4.1 müssen über eine ergänzende Abfrage von Form Features identifiziert werden. So werden bei einem Normteil, nach der DIN EN ISO 10642, zuerst zwei kreisförmige ebene Flächen abgefragt. Die Flächen sind zur Veranschaulichung in Abbildung 4.10 dargestellt. Davon hat eine Fläche nur eine Kontur (Fläche 1) und die andere sieben Konturen (Fläche 2). Zur Ermittlung der Größe des benötigten Sechskantschlüssels werden die zugehörigen Flächen der sieben Konturen

ausgelesen (Fläche 3). Hierbei ergeben sich drei Paare von parallelen Flächen. Der Abstand zwischen diesen Flächen liefert schließlich die benötigte Werkzeuggröße.

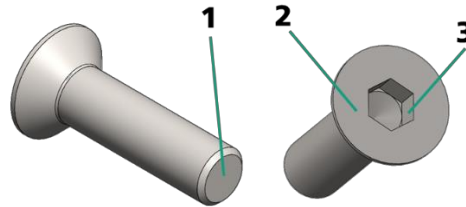


Abbildung 4.10 Prüffaktoren einer Senkschraube mit Innensechskant nach DIN EN ISO 10642

4.2.5 Bestimmung des Basisbauteils

Zuletzt muss mithilfe der Features ein Basisbauteil identifiziert werden. Das Basisbauteil ist das erste Bauteil der Montage und ist damit der Ausgangspunkt für alle weiteren Montageschritte. Durch die Definition eines Basisbauteils wird verhindert, dass beispielsweise eine Schraube als Ausgangspunkt der Montage in Betracht gezogen wird. Damit wird zum einen schon im Vorfeld die Anzahl unvorteilhafter Montagesequenzen reduziert und zum anderen die Rechenzeit verkürzt. Das Basisbauteil wird automatisch auf Grundlage montagerelevanter Eigenschaften ausgewählt. So wird auf Basis der Schwerkraftrichtung zu Beginn eine undurchdringbare Arbeitsfläche definiert. Diese Arbeitsfläche liegt hierbei direkt an der Bounding Box der gesamten Baugruppe an. So muss das Basisbauteil während der ganzen Montage einen Kontakt mit der Arbeitsfläche aufweisen und muss bei Bedarf auf dieser gedreht werden können. Weiterhin muss das Basisbauteil das größte Volumen und die meisten Assembly Features mit weiteren Bauteilen aufweisen, um eine geeignete Basis für weitere Montageschritte darzustellen.

4.3 Featurebasierte Kollisionsanalyse

Basierend auf den ausgearbeiteten Erkenntnissen ist keine vollständige Kollisionsanalyse vonnöten, wenn die Informationsgrundlage der Montageplanung über einen

featurebasierten Ansatz realisiert wird. Ziel der vorliegenden Kollisionsanalyse ist es demnach, ausschließlich gezielte Bewegungen zu erheben. Das Resultat dieser Untersuchungen ist schließlich eine Restriktionsmatrix mit den benötigten Montagerestriktionen und die funktionale Bildung von Unterbaugruppen. Schließlich wird über Werkzeug-Dummies die Zugänglichkeit der benötigten Werkzeuge automatisiert untersucht. Integriert sind diese Untersuchungen direkt in SolidWorks. Ausgangspunkt ist die zusammengebaute Baugruppe inklusive sämtlicher Fixierungselemente. Weder Anpassungen der Baugruppe noch das Editieren einzelner Bauteile sind notwendig.

4.3.1 Identifikation der Montagerichtung

In einer Kollisionsanalyse werden auf Grundlage entstehender Interferenzen Rückschlüsse auf die Montage gezogen. Die Interferenzen gaben schließlich einen Aufschluss darüber, in welcher Richtung ein Bauteil kollisionsfrei demontiert werden kann. Wenn zudem bekannt ist, dass ein Bauteil eine Montage blockiert, kann auf eine Montagerestriktion geschlossen werden und diese kann in einer Präzedenzmatrix gespeichert werden.

Zu Beginn der Kollisionsanalyse muss die Demontagerichtung der Bauteile ermittelt werden, in welcher die Interferenzen untersucht werden. Hierfür werden die bereits erzeugten Assembly Features genutzt. Abbildung 4.11 veranschaulicht drei beispielhafte Szenarien. So hat Bauteil 1 einen planaren Kontakt mit der grünen „Baseplate“. Daher werden die Interferenzen nur entgegen dem Kontakt (grauer Pfeil) untersucht. Bauteil 2 hingegen hat einen konzentrischen Kontakt mit der „Baseplate“. Aus diesem Grund müssen nur Interferenzen zweiseitig in Achsrichtung untersucht werden. Bauteil 3 hingegen hat sowohl einen planaren als auch einen konzentrischen Kontakt. Daher werden Interferenzen nur in Achsrichtung entgegen dem planaren Kontakt untersucht. Für das Basisbauteil ist keine Prüfung vonnöten, da dieses immer als erstes gesetzt wird. Durch die Reduktion der untersuchten Montagerichtungen kann die Kollisionsanalyse schlanker durchgeführt und unmögliche Pfade schon im Vorfeld ausgeschlossen werden.

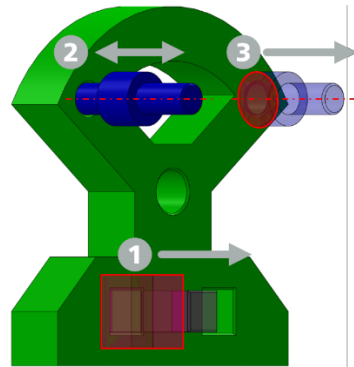


Abbildung 4.11 Ermittlung der (De)montagerichtung auf Basis von Assembly Features

4.3.2 Integration von Normteilen

Eine weitere Besonderheit sind die bekannten Normteile. Mithilfe dieser Informationen ist schon im Vorfeld bekannt, in welche Richtung die Bauteile montiert werden müssen und ob eine Fixierung, wie im Falle der Schraube oder des Sicherungsrings, vorliegt. Durch diese bekannten Informationen können die konstruktionsgeschuldeten, jedoch fehlerhaften, Interferenzen unterdrückt und neutral behandelt werden.

Darüber hinaus kann im Vorfeld auch direkt die Demontagerichtung entlang der Schraubenachse und in Richtung des Schraubenkopfes definiert werden. Weiterhin hilft die Information einer Schraubfixierung, weitere Montagerestriktionen abzuleiten. So erhalten Bauteile, die eine Restriktion durch eine Fixierung aufweisen, eine geringere Wertigkeit in der Demontagesequenz. Basierend darauf muss immer erst eine Fixierung gelöst werden, bevor die fixierten Bauteile demontiert werden können. Für die Montage trifft dies in umgekehrter Reihenfolge zu.

Doch auch bekannte Informationen über eine Unterlegscheibe, wie in Abbildung 4.12a, können dadurch optimiert betrachtet werden. So ist es im Beispiel von Abbildung 4.12a nicht adäquat, erst die Unterlegscheibe auf die Platte zu legen, damit anschließend die Schraube gesetzt werden kann. Daher wird immer, wenn eine Schraube und eine

Unterlegscheibe einen gemeinsamen planaren Kontakt mit entgegengesetzten Normalvektoren aufweisen, gemeinsam montiert. Somit werden die Montagesequenzen dementsprechend angepasst, sodass erst die Unterlegscheibe auf die Schraube gesetzt wird, bevor beide Bauteile miteinander montiert werden.

Anders als sämtliche bisherigen Ansätze werden in dieser Arbeit auch Fixierungen mittels Sicherungsringen unterstützt. So weisen Sicherungsringe immer axiale Interferenzen auf. Bei einer axialen Bewegung trifft dieses Charakteristikum daher auch auf beide Achsrichtungen zu (Abbildung 4.12b). Aus diesem Grund werden diese Interferenzen näher untersucht. So werden die axialen Interferenzen, wie beispielsweise mit einer Welle, unterdrückt und die Kollisionsanalyse wird normal ausgeführt. Die (De)montagerichtung ist hierbei auf die Achse beschränkt.

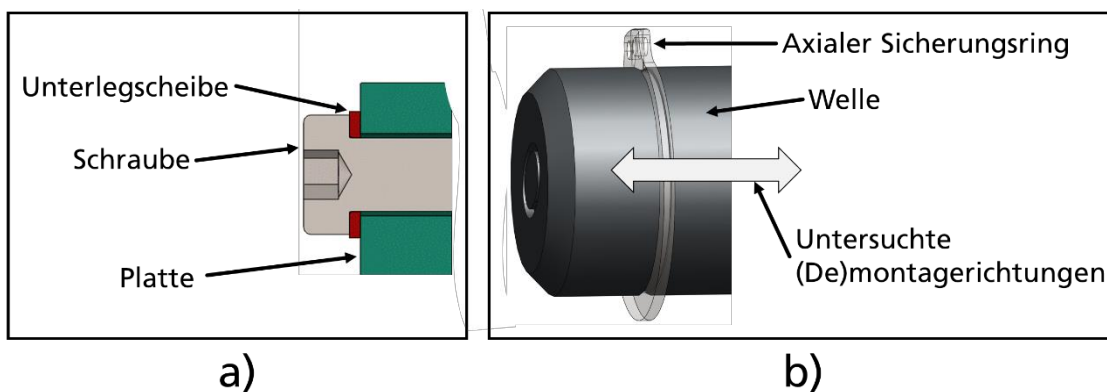


Abbildung 4.12 Montage von Normteilen in einer Kollisionsanalyse

4.3.3 Identifikation von Werkzeugfreiräumen und Zugänglichkeiten

Eine weitere Besonderheit der vorliegenden Untersuchung ist die Einbindung von Montagewerkzeugen. Normteile liefern neben den Informationen zu ihrer Montage auch Aufschluss über das benötigte Montagewerkzeug. Allerdings sollen nicht nur die

Werkzeugwechselkosten minimiert werden, sondern auch deren benötigte Freiräume und Zugänglichkeiten sind Gegenstand der Untersuchungen.

Für die Umsetzung wird ein rotationssymmetrischer Dummie des Werkzeugs generiert und in die korrekte Montageposition in die Baugruppe integriert. Abbildung 4.13 veranschaulicht dieses Vorgehen anhand eines Innensechskantschlüssels. Hierbei werden zwei Untersuchungen vorgenommen. Zuerst muss geprüft werden, ob der Freiraum für die Benutzung des Werkzeugs vorhanden ist. So kommt es, wie in Abbildung 4.13 dargestellt wird, zwar zu Überschneidungen, allerdings ist noch ausreichend Platz für die Anwendung des Werkzeugs vorhanden. Daher wurde ein Wert ermittelt, bei dem eine Montage in Rotationsrichtung noch adäquat zu realisieren ist. Der Wert geht hierbei auf eigene Untersuchungen für eine ergonomische Montage zurück. Somit darf bis zu 60% der Rotationsgeometrie des langen Griffstücks eine Interferenz mit der Baugruppe aufweisen. Bei einem Werkzeugfreiraum von unter 40% wird nicht mehr von einer ergonomischen Montage ausgegangen, sodass keine ausreichender Werkzeugfreiraum erfasst wird. Das kurze Stück selbst darf zu keiner Interferenz führen. Sind diese Vorgaben gegeben, kann von einem ausreichenden Werkzeugfreiraum ausgegangen werden.

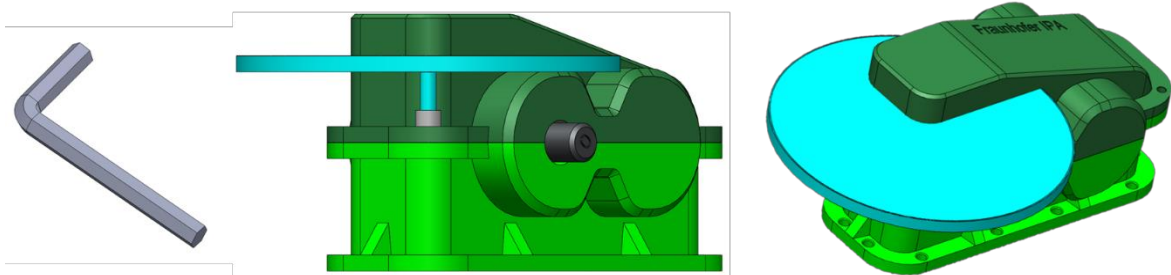


Abbildung 4.13 Visualisierung der Rotationsgeometrie eines Innensechskantschlüssels in einem Getriebe

In einem zweiten Schritt wird die Zugänglichkeit des Werkzeugs erforscht. Hierbei wird das Werkzeug mit der Schraube verschmolzen und muss in der Kollisionsanalyse gemeinsam die Bounding Box der Baugruppe verlassen, ohne dass der zulässige Durchdringungswert des Griffes von 60% überschritten wird.

Umgesetzt wurde dies für alle ermittelten Normteile aus Tabelle 4.1 bzw. den zugehörigen Werkzeugen: Innensechskantschlüssel (Winkelschraubendreher für Schrauben mit Innensechskant nach DIN ISO 2936) der Größen 1,5 – 10 mm und Steckschlüssel-Satz inklusive Knarre mit 1/2 Zoll, 3/8 Zoll und 1/4 Zoll. Für die Steckschlüssel werden die passenden Steckschlüsseleinsätze für Sechskantschrauben der Größen 4-24 mm zugewiesen.

4.3.4 Identifikation von Montagerestriktionen

Nach dem die (De)montagerichtungen und erste Restriktionen feststehen, kann schließlich die Kollisionsanalyse durchgeführt werden. Hierfür werden alle von Konstrukteur/-innen definierten Verknüpfungen aus dem CAD-System unterdrückt. Auf diese Weise ist eine Bewegung der Bauteile möglich. Anschließend werden alle Bauteile inkrementell in die ermittelten Richtungen bewegt, bis diese die Bounding Box der gesamten Baugruppe verlassen. Die Schrittweite kann hierbei vom Nutzer editiert werden. Erst wenn die Bauteile die Bounding Box verlassen haben, gelten die Bauteile als demontiert. Der zurückgelegte Pfad und die Endposition werden für ihre spätere Optimierung gespeichert.

Nach jedem inkrementellen Schritt werden potenzielle Interferenzen durch die Suche von Überschneidungen mithilfe der Funktionen „GetInterferences“ ermittelt. Bei einer auftretenden Interferenz wird das interferierende Bauteil gespeichert und der Montagepfad unterbrochen. Interferenzen mit der Arbeitsfläche werden erhoben und als Montagepfad gesperrt. Auf Basis dieser Interferenzen und mittels der Pfade wird der kürzeste interferenzfreie Pfad ermittelt.

Um komplexere Pfade erheben zu können, sind einfache, lineare Bewegungen nicht immer ausreichend. Aus diesem Grund wurde auch ein Ansatz für eine mehrgliedrige Bewegung entwickelt. In Abbildung 4.14 wird eine solche Notwendigkeit dargestellt. In Bild 1 von Abbildung 4.14 ist eine Baugruppe, bestehend aus einer U-Schiene, einer Platte,

einer Schraube und einer Unterlegscheibe, dargestellt. Bei einer linearen Demontagebewegung der Schraube entgegen der Kontaktrichtung und entlang der Rotationsachse, wird in Bild 2 sichtbar, dass es zu einer Interferenz mit der U-Schiene kommt. Allerdings kann die U-Schiene nicht demontiert werden, bevor die Schraubverbindung gelöst und entfernt wurde. Da die Schraubverbindung eine höherwertige Montagerestriktion darstellt, werden automatisch alternative Pfade für die Schraube untersucht. Wie im 3. Bild von Abbildung 4.14 hervorgehoben ist, verlässt die Schraube zuerst die eigene Bounding Box in der definierten Richtung entlang der Achse. Nachdem die ursprüngliche Bounding Box verlassen wurde, werden orthogonal zur Demontagerichtung alternative Pfade untersucht. In Bild 4a wird schließlich eine erste Möglichkeit gefunden, die Schraube zu demontieren, in dem diese die Bounding Box der Baugruppe verlässt. In Bild 4b kommt es daraufhin zu einer Kollision und der Pfad wird gesperrt. In Bild 4c und 4d wird schließlich ein noch kürzerer Demontagepfad identifiziert. Aufgrund des kürzesten Pfades wird schließlich der finale Demontagepfad (Bild 5 in Abbildung 4.14) definiert. In dem abgebildeten Beispiel fällt die Wahl hierzu auf die Alternative 4d, da diese in der Sichtrichtung montiert werden kann und die Baugruppe daher nicht gewendet wird.

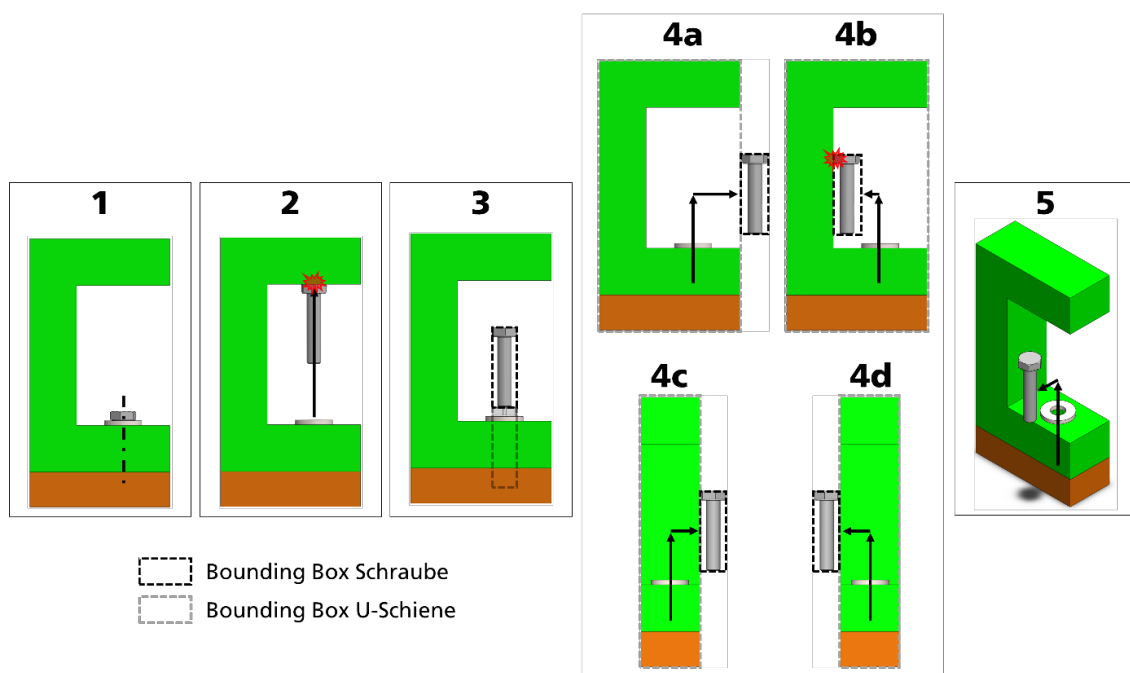


Abbildung 4.14 Analyse mehrgliedriger Bewegungen

Eine weitere Montagerestriktion stellt zudem die Schwerkraft dar. In Abbildung 4.15 ist drei Mal dieselbe Baugruppe in einer anderen Ausrichtung zu sehen. Je nach Ausrichtung unterscheiden sich die Montagestrategien grundlegend voneinander. Damit kann eine Montagesequenz auch immer nur auf eine Ausrichtung zutreffen. Allerdings können in einer realen Montage meist nicht alle Bauteile von einer Richtung aus montiert werden.

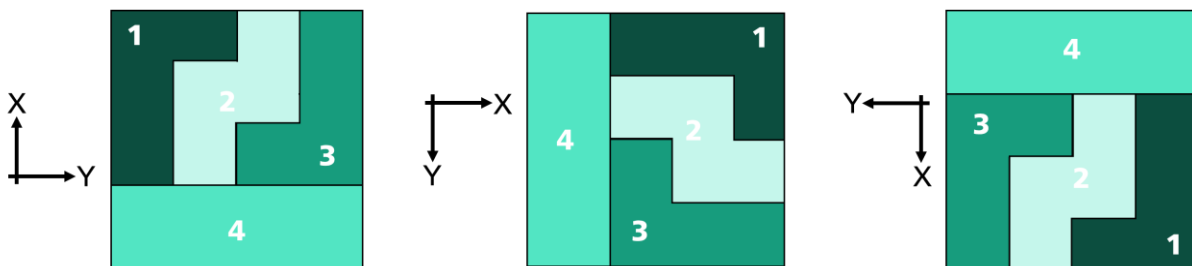


Abbildung 4.15 Einfluss der Schwerkraftrichtung auf die Montage

Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit Schwerkraftbetrachtungen vorgenommen. Basierend auf diesen Voruntersuchungen können in der späteren Auswertung der Montagesequenzen auch Baugruppenrotationen oder Wendungen in Betracht gezogen werden. Damit können nach einer Neuausrichtung der Baugruppe weiterhin schwerkraftstabile Montagesequenzen gebildet werden. Für die Umsetzung müssen schließlich sechs Schwerkraftbetrachtungen in jeder der Koordinatenrichtungen durchgeführt werden. Das Resultat sind schließlich sechs unterschiedliche Restriktionsmatrizen in Abhängigkeit von der Schwerkraftrichtung. Hinterlegt und gespeichert werden diese Ergebnisse in Form von Matrizen.

4.4 Bestimmung der Montagesequenz

Nachdem sämtliche relevanten Informationen aus dem 3D-Modell extrahiert bzw. generiert wurden, müssen diese Informationen aufbereitet werden. Diese Informationen bilden die Basis für die Optimierungskriterien und die Bewertung der Montagesequenzen.

Eine optimale Montagesequenz muss hierzu in einem ersten Schritt die erarbeiteten Restriktionen, wie die geometrischen Restriktionen oder Montagerestriktionen, einhalten. Basierend auf diesen Restriktionen wird der Lösungsraum modelliert und stellt stabile und valide Montagesequenzen sicher. In einem zweiten Schritt werden die daraus resultierenden Montagesequenzen über eine Kostenfunktion optimiert.

Die Optimierungs- und Bewertungskriterien gehen weit über den Stand der Technik hinaus und werden dynamisch untersucht. Dies geht darauf zurück, dass das bisher montierte Bauteil immer auch einen direkten Einfluss auf die nachfolgenden Montageschritte bzw. Kostenfunktionen hat. Optimiert wird die Montagesequenz hinsichtlich ihrer Montagezeit und damit der Montagekosten. Wie schon hervorgehoben wurde, hat die Montage einen erheblichen Einfluss auf die Montagekosten und -zeit. Dies geht darauf zurück, dass die Montagezeit direkt mit den Montagekosten korreliert. So wird auch bei einer Automatisierungspotenzial-Analyse (APA) des Fraunhofer IPA die Einsparung von Automatisierungslösungen alleine durch die Prozesszeit als Variable bestimmt (Neb 2020). Somit ist es zur Optimierung der Montagesequenz essenziell, die Optimierungsfunktion hinsichtlich der Zielgrößen, die Einfluss auf die Montagezeit nehmen, zu optimieren und gleichzeitig auch die Montagestabilität zu gewährleisten.

4.4.1 Optimierungskriterien

Basierend auf der Feature-Extraktion und der featurebasierten Kollisionsanalyse wurde eine ausgeprägte Informationsgrundlage für die Planung der Montagesequenz erstellt. Diese bildet die Basis für sämtliche Optimierungs- und Bewertungskriterien zur automatischen Bestimmung der Montagesequenzen.

Entsprechend wurden in einem ersten Schritt, wie in Abbildung 4.16 dargestellt, die Beziehungen zwischen den Bauteilen analysiert und in Form von Assembly Features

ausgewertet. Mithilfe dieser sind die Art der Beziehung und deren Abhängigkeit bekannt. In der nächsten Auswertung wurden die Normteile ausgelesen und ein Montagewerkzeug zugewiesen. Weiterhin wurde auch schon im Vorfeld featurebasiert das Basisbauteil bestimmt, das den bestmöglichen Anfang der Montagesequenz bietet.

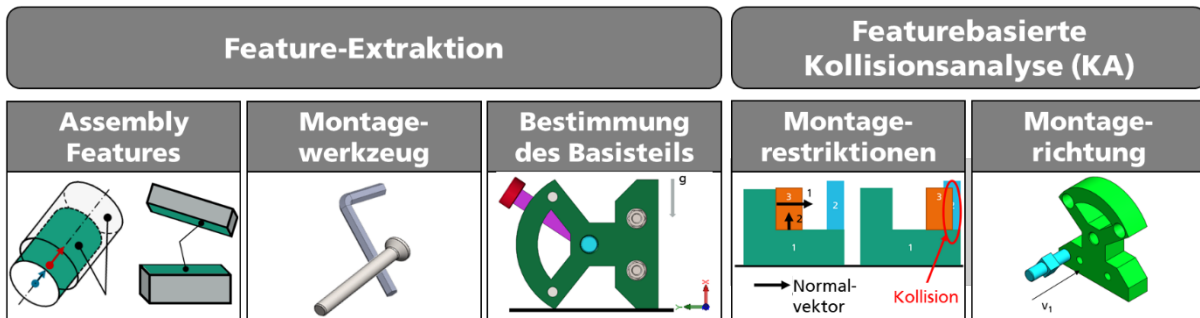


Abbildung 4.16 Generierte Informationen aus dem 3D-Modell

Eine zweite Analyse wurde schließlich mithilfe einer featurebasierten Kollisionsanalyse durchgeführt (Abbildung 4.16). Mithilfe der gezielten Führung durch die Features konnten mehr Informationen ausgelesen und gleichzeitig die Rechenzeit reduziert werden. Das Resultat sind präzise Montagerestriktionen und Montagerichtungen auf Grundlage der Assembly Features, Normteile und Werkzeuge. Durch diese Aufbereitung der Informationen können unmögliche und unvorteilhafte Montagesequenzen schon im Vorfeld eliminiert werden und der Fokus kann auf die Optimierung der möglichen Montagesequenzen gesetzt werden.

Zur Bestimmung der optimierten Montagesequenz müssen die Informationen zu Beginn modelliert und mithilfe von Optimierungskriterien bewertet werden. Vergangene Arbeiten haben verdeutlicht, dass einfache Kriterien, wie die Verbindungsart, keine Aussage über die Qualität einer Montagesequenz machen können. Daher wurden aus den generierten Informationen in Abbildung 4.16 neun montagerelevante Optimierungskriterien abgeleitet. Abbildung 4.17 veranschaulicht diese neuartigen resultierenden Optimierungskriterien, die im Folgenden behandelt werden.

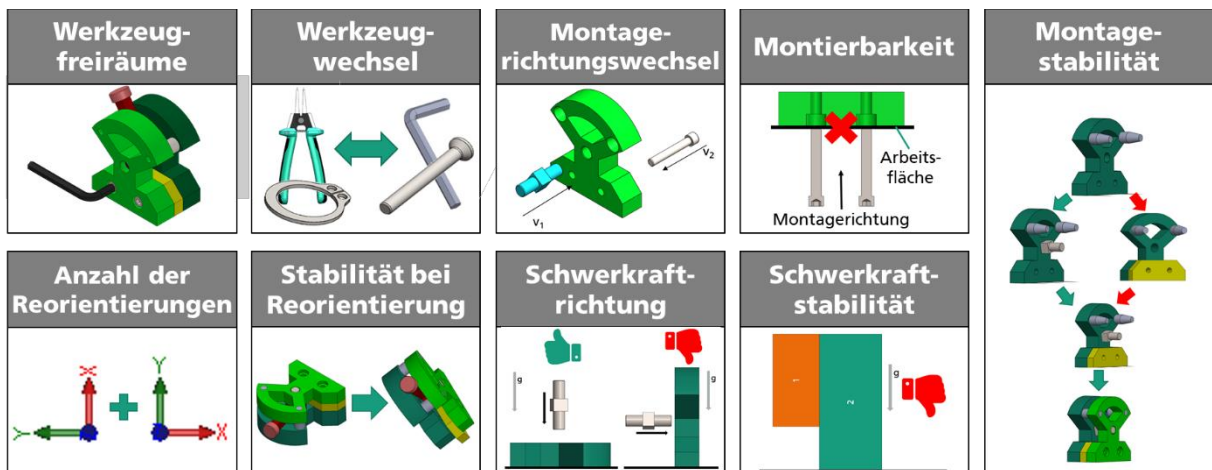


Abbildung 4.17 Resultierende Optimierungskriterien

Das erste Kriterium sind die **Werkzeugfreiräume** der Normteilmontage. Diese sind abhängig von der Montagesequenz bzw. den montierten Bauteilen. Je nach Szenario muss daher betrachtet werden, wann eine Fixierung benötigt wird und ob diese auch durchgeführt werden kann. Die Freiräume dürfen nur so weit zugebaut werden, bis es zu einer Überschneidung von maximal 60% kommt (siehe Kapitel 4.3.3)

Im direkten Zusammenhang mit dem Werkzeug steht auch der **Werkzeugwechsel**. Diesen Wechsel gilt es zu minimieren, allerdings muss auch immer die Montagestabilität und Zugänglichkeit betrachtet werden. Erfasst werden die Werkzeugwechsel im Vorfeld durch den Abgleich der benötigten Werkzeuge.

Analog dazu werden auch die **Montagerichtungswechsel** erfasst. So wird schon im Vorfeld, basierend auf den Normalvektoren, die Montagerichtung erfasst und kann miteinander im gemeinsamen Koordinatensystem verglichen werden. Wenn schließlich ein Wechsel des Werkzeugs oder der Montagerichtung vorliegt, werden die Kanten mit einer „1“ bewertet, falls nicht mit einer „0“. Die Summe der Wechsel wird hierbei als Index „W“ für die Optimierung hinterlegt. Die Wechsel der Werkzeuge und Montagerichtungen stellen einen Optimierungsfaktor dar, der zwar zu einer besseren

Bewertung bestimmter Montagesequenzen führt, allerdings Alternativen nicht direkt ausschließt.

Anders ist dies bei der **Montierbarkeit**. Wenn eine Montage aufgrund der Arbeitsfläche nicht zu realisieren ist, wird diese Kante für die zutreffende Schwerkraftrichtung gesperrt. Montageprozesse dieser Art können jedoch in den meisten Fällen durch eine Reorientierung der Baugruppe wieder ermöglicht werden.

Reorientierungen sind bei einer größeren oder komplexen Baugruppe nicht zu vermeiden. Allerdings haben übermäßige Reorientierungen auch einen sehr starken Einfluss auf die Prozesszeit der Montage. Da die bisherigen direkten Ansätze nur bedingt Reorientierungen erkennen bzw. einbeziehen können, wurde ein stufenloses Vorgehen auf Basis des Orientierungswinkels entwickelt. Damit wird der tatsächliche Winkel der Reorientierung zwischen zwei Montageprozessen ausgelesen und als prozentuale Gewichtung in die Kostenfunktion integriert. Der Grad der Reorientierung wird hierbei als „*R*“ im Graphen hinterlegt. Bei Reorientierung $<10^\circ$ kann diese aufgrund des zu geringen Einflusses vernachlässigt werden.

Auch die **Stabilität bei der Reorientierung** beeinflusst die Montagestabilität. Aus diesem Grund wird bei einer potenziellen Reorientierung immer die Stabilität der Baugruppe abgefragt. Wenn beispielsweise, wie in Abbildung 4.17, ein Bauteil nur zwei Kontaktflächen mit anderen Bauteilen aufweist (gelbes Bauteil), so ist die Baugruppe nicht stabil und darf entsprechend nicht reorientiert werden.

Für eine Reorientierung müssen alle Bauteile fixiert sein oder sich vorteilhaft in **Schwerkraftrichtung** reorientieren. Daher wird auch die Zulässigkeit eines Montageprozesses abgefragt. So sind planare oder konische Kontakte nur in Schwerkraftrichtung gestattet, wohingegen zylindrische Kontakte auch bei maximal 90°

zur Schwerkrafttrichtung durchgeführt werden dürfen. Dies geht darauf zurück, dass die physische Stabilität der Baugruppe durch die Zentrierung gewährleistet bleibt. Sobald eine Fixierung vorliegt oder die Freiheitsgrade durch kombinierte Assembly Features, wie beispielsweise zwei gegenläufige zylindrische Kontakte, eingeschränkt wurden, ist eine stabile Reorientierung gewährleistet.

Im selben Zug wird auch die **Schwerkraftstabilität** eines potenziellen Montageprozesses geprüft. Wenn ein Montageprozess durch eine Montage nicht mindestens eine Zentrierung oder zwei sonstige Kontakte aufweist, ist eine Montage unzulässig. Die Arbeitsfläche wird hierbei auch als Kontakt gewertet.

Zu guter Letzt wird auch die **Montagestabilität** der gesamten Baugruppe bewertet. Da eine Gefahr durch äußere Einflüsse nie auszuschließen ist, sollte immer die stabilste Alternative verbaut werden. Abbildung 4.17 zeigt ein beispielhaftes Szenario mit zwei zulässigen Montagesequenzen. Die Alternative mit den roten Pfeilen montiert erst das gelbe Bauteil, bevor es das graue Bauteil in der Mitte montiert. In dieser Zeit weist das gelbe Bauteil zwar zwei planare Kontakte auf, ist allerdings aufgrund von *drei* verbleibenden Freiheitsgraden anfällig für äußere Einflüsse. Die Alternative mit den grünen Pfeilen hingegen montiert zuerst das graue Bauteil in der Mitte und anschließend das gelbe Bauteil. Dem grauen Bauteil bleibt nach der Montage nur *ein* Freiheitsgrad. In einem nachfolgenden Schritt werden zwar beide Bauteile fixiert, allerdings weist die Alternative mit den grünen Pfeilen eine höhere Stabilität gegen äußere Einflüsse auf. Die grüne Alternative würde somit, basierend auf den Freiheitsgraden, zu einer Montagestabilität „5“ von „1“ führen, wohingegen die rote Alternative zu einer „3“ führen würde.

Damit ergeben sich aus den Optimierungskriterien diverse Kriterien, die zwingend erforderlich sind bzw. erfüllt werden müssen, und Kriterien, die Alternativen bewerten.

Unter den Kriterien der Alternativen findet sich die Summe der Werkzeug- und Richtungswechsel W_i , die der Reorientierung R_i sowie diejenige der Montagestabilität S_i . Der Einfluss auf die Montagezeit eines Montageprozesses wird damit über die Summe aus W_i und R_i beschrieben. Die Montagestabilität hingegen hat einen Einfluss auf die Ausführung des Montageprozesses selbst und wird daher mit der Summe der Zeitverzögerung multipliziert. Daraus resultiert die Kostenfunktion F_i in Formel 4.1. Mithilfe der Kostenfunktion F_i und den zu erfüllenden Kriterien können die Alternativen einer Montagesequenz abgewogen und bewertet werden. Eine Montagesequenz ist hierbei erst vollendet, wenn alle Bauteile montiert wurden.

$$F_i = S_i * (R_i + W_i) \quad (4.1)$$

4.4.2 Modellierung

Wie in Kapitel 3 erarbeitet wurde, stößt ein lineares, regelbasiertes Lösungssystem an die Grenzen bei der Modellierung der komplexen Montagebeziehungen einer größeren Baugruppe. Aus diesem Grund wurde eine Modellierung mithilfe gerichteter Kanten bzw. Abhängigkeiten gewählt. Auf diese Weise ist es möglich, komplexere Zusammenhänge und unterschiedliche Arten von Abhängigkeiten zu modellieren. Vor allem das kombinatorische Optimierungsproblem Traveling Salesperson Problem, vorgestellt in Kapitel 2.2.7, ist aufgrund des Hamiltonkreises für die Lösungsfindung prädestiniert. Hierzu muss jeder Knoten genau einmal besucht werden. Bei einem geschlossenen Kreis gilt der Graph als hamiltonsch und erfüllt die Vorgaben. Ein hypohamiltonscher Graph ist hierbei nicht zulässig, da dieser auf getrennte bzw. nicht kombinierbare Baugruppen schließen würde.

Der Vorteil dieses gerichteten Graphen gegenüber sämtlichen Alternativen, wie dem populären AND/OR-Graphen, ist, dass nicht schon zu Beginn der Optimierung alle Zustände bekannt sein müssen. So ändern sich die verfügbaren Möglichkeiten bei einer Montage mit jedem weiteren Bauteil und jeder alternativen Montagesequenz. Lediglich

die ermittelten geometrischen Montagerestriktionen gelten als konstante Einschränkungen. Zwar haben Untersuchungen gezeigt, dass auch effizientere Algorithmen, wie der genetische Algorithmus, aufgrund der Neuberechnung der Fitnessfunktion nach jeder Generation, fähig sind mit veränderlichen und konstanten Montagerestriktionen zu arbeiten. Jedoch führt genau diese Eigenschaft dazu, dass das globale Maximum nur schwer abzuschätzen ist, da nach jeder Generation ein neuer Wert ermittelt werden muss und nicht bekannt ist, wann das tatsächliche Maximum erreicht wird. Weiterhin können auch keine Unterbaugruppen gesondert betrachtet werden.

Basierend auf diesen Einschränkungen fällt die Wahl auf die Modellierung eines Wegfindungsproblems mit zusätzlichen Restriktionen. Der Graph ist hierbei definiert als $G = (V, E)$ mit $|V| = n$ Knoten (Bauteilen) und $|E| = m$ Kanten (Abhängigkeiten und Beziehungen). Hierbei weist jeder Knoten $2 \cdot (n-1)$ Kanten auf. Davon $n-1$ eingehende Kanten, welche den Einfluss anderer Bauteile definieren und $n-1$ ausgehende Kanten, welche den Einfluss des Bauteils auf die restlichen Bauteile beschreiben. Die Kanten beschreiben hierbei zum einen die Montagerestriktionen und zum anderen die Art der Montage, welche als Assembly Feature definiert ist. Die Kostenfunktionen der Kanten hängen hierbei von den zuvor montierten Bauteilen bzw. gewählten Knoten ab, da beispielsweise eine Reorientierung oder Werkzeugwechsel diese beeinflussen.

4.4.3 Bestimmung der optimierten Montagesequenz

In einem nächsten Schritt geht es um die Identifikation der besten Alternative, basierend auf den ausgearbeiteten Optimierungskriterien aus dem gesamten Lösungsraum. Untersucht wird der vorgestellte *Graph* G dadurch, dass die Kanten entlang ihrer verfügbaren bzw. nicht restriktierten und geführten Richtung abgefragt werden. Eine optimale Montagesequenz muss hierbei die Optimierungskriterien erfüllen und den kürzesten Pfad durch alle Knoten finden.

Als Lösungsalgorithmus wurde der Cheapest Insertion Algorithm von Google OR-Tools gewählt. Diese Entscheidung geht darauf zurück, dass dieser Algorithmus in der Vergangenheit ein hohes Potenzial bei Wegfindungsproblemen bzw. TSP bewies. So konnten in vorangehenden Arbeiten Gesamtstrecken um ca. 20% verkürzt werden (Hignasari et al. 2018). Weiterhin bietet dieser Algorithmus die essenzielle Möglichkeit, Restriktionen einzubinden und Untertouren bzw. Unterbaugruppen zu bilden. Saleh et al. (2015) und Hignasari et al. (2018) kamen zudem zum Ergebnis, dass vergleichbare Problemstellungen mit diesem Algorithmus immer zu optimalen Lösungen führen. Ermöglicht wird dies dadurch, dass die neuen einzusetzenden Knoten immer zwischen zwei verbundenen Knoten eingesetzt werden, wenn sich daraus ein kürzerer Weg bzw. geringere Kosten ergeben. Abbildung 4.18 veranschaulicht dieses Vorgehen.

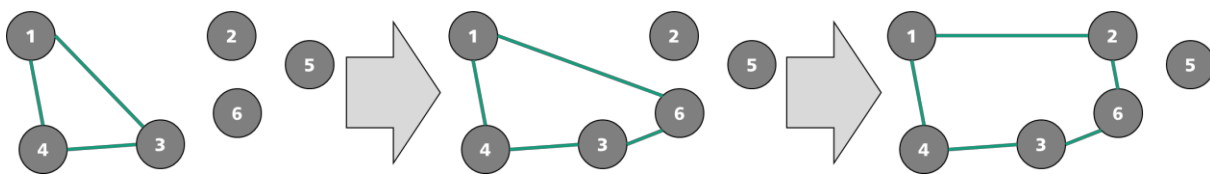


Abbildung 4.18 Symbolische Darstellung des Cheapest Insertion Algorithm

Nachdem sämtliche Informationen mithilfe eines SolidWorks-Makros extrahiert wurden, wird ein Python 3.7 Skript aufgerufen, um auf den Lösungsalgorithmus zuzugreifen. Jede Kante ist durch Restriktionen und eine Kostenfunktion definiert. Bei einer Neuausrichtung oder Wendung der Baugruppe ändern sich entsprechend die jeweiligen Kostenfunktionen aufgrund der neuen Schwerkraftrichtung. Diese Änderungen werden allerdings nur vorgenommen, wenn keine bessere Alternative vorhanden ist bzw. eine Montage anders nicht realisiert werden kann.

Als Abwandlung im Vergleich zu der herkömmlichen Optimierung ist zu nennen, dass jeder Knoten bzw. jedes Bauteil nochmals als Dummie-Knoten abgebildet werden muss. Dies ist damit zu begründen, dass in der Modellierung als Wegfindungsproblem ein

Knoten mit einer Restriktion nicht selbst eine Restriktion für einen anderen Knoten darstellen darf. Umgangen wird diese Einschränkung, indem die Kostenfunktion zwischen dem Dummie-Knoten und dem Original hierbei 0 ist und somit nach dem Originalknoten immer der Dummie-Knoten folgen muss. Weiterhin entsprechen alle Kostenfunktionen in Richtung des Erstknotens 0, damit auch immer das Basisbauteil wieder das Ende bildet. Damit wird sichergestellt, dass nach Auswahl sämtlicher Knoten der Hamiltonkreis wieder geschlossen wird, ohne das Ergebnis zu gefährden.

Zur Bildung der Montagesequenz ist allerdings auch die Bildung und Analyse von Unterbaugruppen notwendig. Untersuchungen zeigen, dass viele der größeren Baugruppen sich nicht ohne eine Vormontage montieren lassen. Abbildung 4.19 veranschaulicht eine übliche Baugruppe, die sich nicht linear montieren lässt. So ist ersichtlich, dass die Montage der Welleneinheit außerhalb des Gehäuses erfolgt und als Unterbaugruppe eingesetzt werden muss. Die Identifikation der Unterbaugruppen wird über die extrahierten geometrischen Restriktionen ermittelt, wenn eine Gruppe von Bauteilen gemeinsame Restriktionen aufweist und keine Möglichkeit für eine kollisionsfreie Montage liefert.

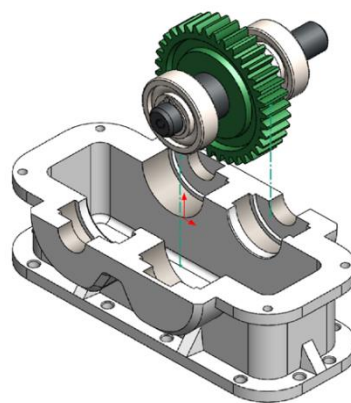


Abbildung 4.19 Montage einer Welleneinheit als Unterbaugruppe in die Hauptbaugruppe

Unterbaugruppen müssen nicht zwingend montagestabil sein, lediglich schwerkraftstabil (Abbildung 4.17). Dies geht darauf zurück, dass Unterbaugruppen sich oftmals erst nach ihrer Montage in einen montagestabilen Zustand begeben. Daher wird angenommen, dass Unterbaugruppen nach ihrer Vormontage in Position bleiben und sich nicht verändern, bis diese montiert werden.

Im Falle einer identifizierten Unterbaugruppe wird analog zur übergeordneten Montagesequenz nach der optimierten Unterbaugruppenmontagesequenz gesucht. Hierfür wird zuerst wieder ein Basisbauteil als ein Start- und Endknoten auf Grundlage der Features bestimmt (siehe Kapitel 4.2.5). Anschließend wird gesondert nach der optimalen Lösung über die Kostenfunktion gesucht. Unterbaugruppen werden in der übergeordneten Montagesequenz als einzelner Knoten des Unterbaugruppenbasisteils hinterlegt. Erst wenn dieser Knoten als nächster Montageschritt gewählt wird, beginnt die Montage der Unterbaugruppe. Ein Vorteil dieses Vorgehens ist, dass mit jeder Unterbaugruppe die Komplexität der Optimierung reduziert wird. Eine Unterbaugruppe kann hierbei eine vollständige Montageeinheit wie in Abbildung 4.19 sein oder auch lediglich eine Schraube mit einer Unterlegscheibe.

Weiterhin wird dieses Vorgehen auch für die Gruppierung von gleichartigen Schrauben verwendet, die über die Normerkennung identifiziert wurden (siehe Kapitel 4.2.4). Wenn eine Fixierung mithilfe einer Schraube vorgenommen wird, wird daher abgefragt, ob weitere Schraubentypen für die vorliegende Fixierung vorgesehen sind. In diesem Fall werden die Schrauben gruppiert. Dieses Vorgehen wird allerdings nur für Schrauben derselben Norm durchgeführt. Hierbei gelten die Schrauben allerdings nicht als Unterbaugruppe, sondern als ein einzelner, gruppierter Montageschritt. Diese Gruppierung ist bei der Darstellung von Montageprozessen sehr gängig und spielt bei der nachträglichen Visualisierung eine Rolle. Gespeichert werden die Unterbaugruppenmontagesequenzen sowie die übergeordnete Montagesequenz in Form einer Excel-Matrix als Zwischenspeicher für weiterführende Prozesse.

4.5 Visualisierung der Montagesequenz

Nach der erfolgreichen Bestimmung der optimierten Montagesequenz geht es um die Visualisierung des Ergebnisses. Für dieses Vorgehen wurde eine konventionelle Montageanleitung gewählt. Sowohl für Konsum- als auch Industriegütern ist jedes Unternehmen verpflichtet, eine Montageanleitung zu erstellen. So definiert das BGB zum Beispiel, dass eine mangelhafte Montageanleitung als Sachmangel zu deklarieren ist (§ 434 BGB Abs. 2 Satz 2). Jedoch sind Montageanleitungen mehr als nur verpflichtende Dokumente. Sie werden auch an Stellen benötigt, an denen diese nicht vorgeschrieben werden. So braucht es Montageanleitungen in der Produktion, um das Montagewissen weiterzugeben.

Allerdings ist die Erstellung von verständlichen Montageanleitungen bis heute ein sehr aufwendiger manueller Prozess, der in einem redaktionellen Verfahren durchgeführt werden muss. Im Rahmen dieser Arbeit werden die extrahierten Montageinformationen aus dem 3D-Modell zusätzlich noch genutzt, um auch für dieses Forschungsfeld eine mögliche Lösungsalternative vorzustellen.

Der Lösungsansatz wurde bereits in Neb et al. (2021d) beschrieben. Implementiert wurde die Applikation hierbei mithilfe eines internen Ansatzes direkt im CAD-System SolidWorks. Dazu werden in einem ersten Schritt die Visualisierungen der einzelnen Montageschritte erstellt, um im Anschluss in Form einer PowerPoint Montageanleitung ihren Einsatz zu finden.

Für die automatische Generierung der Darstellung der einzelnen Montageschritte wird der aktuellste Stand der Baugruppe in der vorgesehenen Schwerkraftrichtung dargestellt. Weiterhin wird das nächste zu montierende Bauteil in einer unmontierten Lage dargestellt. Diese Lage befindet sich hierbei 10 cm außerhalb der Gesamtbaugruppen-

Bounding Box entgegen der Montagerichtung. Bei besonders großen Baugruppen empfiehlt es sich, die voreingestellten 10 cm auf ein größeres bzw. passenderes Maß zu erhöhen.

Der Montagepfad wird, wie in Abbildung 4.20a veranschaulicht, mithilfe einer Strichpunktlinie visualisiert. Diese Linie befindet sich bei zylindrischen Kontakten in Achsrichtung und bei allen weiteren Kontaktarten im Massenschwerpunkt entgegen des Normalvektors. Falls ein Montagewerkzeug einem Prozess zugeordnet wurde, wird auch dieses visuell mithilfe eines symbolischen Beispielbildes dargestellt.

Die automatisch generierte Montageanleitung beginnt und endet mit einem Deckblatt. Auf diesem befindet sich der Name der Baugruppe bzw. der Name der eingelesenen Datei, eine Darstellung der Baugruppe und eine Übersicht des benötigten Werkzeugs (Abbildung 4.20b). Weiterhin umfasst die Montageanleitung eine Übersicht sämtlicher Einzelbauteile und eine Seite pro Montageschritt, abzüglich des Basisbauteils, da dieses die Ausgangssituation darstellt. Eine vollständige und automatisch generierte Montageanleitung findet sich im Anhang 9.4.

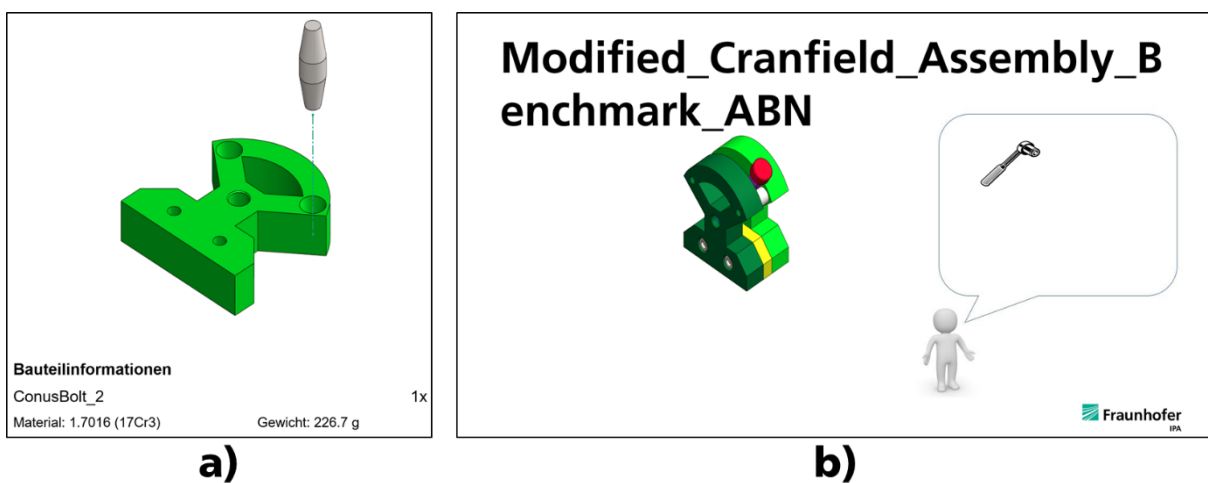


Abbildung 4.20 Darstellung der automatisch generierten Montageanleitung

5 Validierung der Montagesequenzen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges Vorgehen zur Extraktion montagerelevanter Informationen aus einem 3D-Modell ausgearbeitet. Das Resultat sind Optimierungskriterien zur automatischen Bestimmung von Montagesequenzen. Diese Optimierungskriterien werden im Folgenden darauf hin untersucht, ob sie ausreichend sind, um stabile und valide Montagesequenzen automatisiert zu generieren. Da die Planung von Montagesequenzen heute noch zum Expertenwissen gehört, welches durch jahrelange Erfahrung angeeignet werden muss, werden Expertenmeinungen zu den Ergebnissen eingeholt. Hierzu soll geprüft werden, ob die Optimierungskriterien, inklusive deren Gewichtungen, den industriellen Anforderungen entsprechen und die automatisch generierten Montagesequenzen das gewünschte Verbesserungspotenzial erbringen.

Für dieses Ziel wird eine dreistufige Validierung durchgeführt (Abbildung 5.1). In einem ersten Schritt wird eine quantitative Auswertung sämtlicher Ergebnisse durchgeführt, um auf die Umsetzung und die damit verbundenen Limitierungen einzugehen. Im Anschluss wird das entwickelte System von Experten aus der Dokumentationsdienstleistung bewertet. Hierzu wurden Experteninterviews geführt. Nachfolgend werden Montagesequenzen von realen Produkten aus dem Konsumgüterbereich generiert, um diese anschließend mit den öffentlich zugänglichen Montageanleitungen abzugleichen.



Abbildung 5.1 Dreistufige Validierung der Arbeit

5.1 Quantitative Bewertung der Ergebnisse

Zur Bewertung des entwickelten Systems wurden sechs unterschiedliche Anwendungsfälle herangezogen. Diese reichen von Benchmark Bauteilen, wie dem Cranfield Assembly Benchmark (CAB) (Collins et al. 1985), bis hin zu realen Produkten. Getestet wurden sämtliche Anwendungsfälle auf einem „Dell Gaming G3 15“ mit einer Intel i7-1075H (2,60GHz) CPU, 16,00 GB DDR4 (2,933 MHz) RAM und einer NVIDIA® GeForce® GTX 1660 Ti 6,00 GB GDDR6 Grafikkarte. Das entwickelte System ist kompatibel mit den SolidWorks-Versionen 2016-2020. Ältere Versionen wurden nicht erprobt, da CAD-Modelle nicht abwärtskompatibel sind. Alle generierten Montagesequenzen waren valide und stabil. Im Folgenden soll der messbare Einfluss der Baugruppen auf die Montagesequenzen untersucht werden. Tabelle 5.1 veranschaulicht die untersuchten Anwendungsfälle, deren Anzahl an Bauteilen und die benötigte Rechenzeit.

Tabelle 5.1 Untersuchte Anwendungsfälle

	Cranfield Assembly Benchmark (CAB)	Modified Cranfield Assembly Benchmark (MCAB)	Einstufiges Stirnradgetriebe (ESG)	IKEA LACK Beistelltisch - Nachbau (Inter IKEA Systems B.V.)	IKEA KALLAX Regal - Nachbau (Inter IKEA Systems B.V.)	Schaltleiste K5-2B00DE.480 (ELABO GmbH)
						
Anzahl Bauteile	10	14	19	9	55	14
Benötigte Rechenzeit	209 s	188 s	1.115 s	58 s	44.476 s	1.166 s

Aus den erfassten Ergebnissen wird ersichtlich, dass die Anzahl der Bauteile und damit auch die Montageprozesse nicht zwingend mit der benötigten Rechenzeit korrelieren. Besonders wird dies beim Vergleich des CAB und des Modified Cranfield Assembly Benchmark (MCAB) erkennbar. Im Kern sind beide Baugruppen nahezu identisch, jedoch

konnte die Analyse des MCAB trotz der größeren Anzahl an Bauteilen ca. 10% schneller durchgeführt werden. Ein Unterschied der Baugruppen liegt darin, dass sich im MCAB anstelle der orangefarbenen Klotz-Elemente je zwei Schrauben, Unterlegscheiben und Muttern befinden. Weiterhin wurden die zylindrischen blauen Stifte durch violette konische Stifte ersetzt (Abbildung 5.2). Der Wechsel der Stifte wurde lediglich zur Erprobung unterschiedlicher zylindrischer Stifte vorgenommen. Die Besonderheit liegt in der Ergänzung der Fixierungselemente. So weist das MCAB zwar vier Bauteile mehr auf und muss daher vier zusätzliche Kollisionsanalysen durchführen, doch die zusätzliche Stabilität durch die Fixierung und die im Vorfeld bekannten Montagerichtungen reduzieren die Anzahl der benötigten Untersuchungen. Dies ist alleine darauf zurückzuführen, dass die Kollisionsanalyse für Normteile aufgrund der bekannten Montage deutlich reduzierter ablaufen kann. Somit kann gefolgert werden, dass zusätzliche Bauteile nicht zwingend zu einem Anstieg der Rechenzeit führen, wenn wichtige Fixierungen vorhanden sind und Normteile erkannt werden.

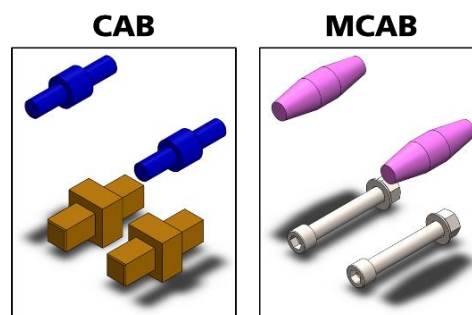


Abbildung 5.2 Unterschied CAB und MCAB

Eine weitere Besonderheit kann zwischen dem CAB und dem IKEA LACK Beistelltisch (im folgenden LACK) beobachtet werden. So weist der Anwendungsfall LACK zwar auch keine Normteile sowie ein Bauteil weniger auf, jedoch benötigt er nur ~28% der Rechenzeit des CAB. Selbst bei der Löschung beider blauen Stifte des CAB ist LACK immer noch doppelt so schnell fertig wie das CAB. Dies liegt vor allem an den simplen Konturen und den eindeutigen Montagerichtungen aus der Feature-Extraktion. So ist aufgrund der Zylinderachse und der planaren Kontakte bekannt, in welche Richtung die Bauteile

montiert werden müssen und sie bedürfen damit auch nur einer Kollisionsanalyse in eine einzige Richtung. Abbildung 5.3 veranschaulicht, dass das Tischbein einen ebenen Kontakt mit der Tischplatte und einen zylindrischen und ebenen Kontakt mit dem Verbindungsstift aufweist. Dadurch ist eine Analyse lediglich gegen die einheitlichen Normalvektoren vonnöten. Somit zeigt sich, dass je definierter die Kollisionsanalyse auf Basis der Features durchgeführt werden kann, desto geringer die Rechen- bzw. Analysezeit ausfällt.

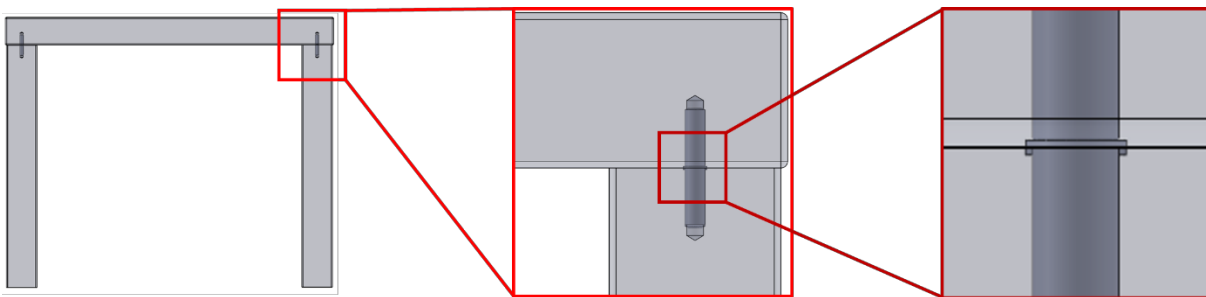


Abbildung 5.3 Montage der Tischbeine des LACK

Die längste dokumentierte Rechenzeit wurde beim IKEA KALLAX Regal - im Folgenden KALLAX genannt – gemessen. Auch hier führten die Untersuchungen zu einer aufwendigen Kollisionsanalyse. Abbildung 5.4 veranschaulicht die Problemstellung. Zur Rechten findet sich im gelben Kasten die Darstellung einer Schraube für die Seitenelemente wieder. Diese hat am Schraubenkopf einen planaren Kontakt mit dem oberen Seitenelement und einen zylindrisch fixierenden Kontakt mit dem rechten Seitenelement. Deshalb kann eine Montage nur von oben erfolgen. Anders ist dies allerdings mit den Dübeln zur Linken im roten Kasten in Abbildung 5.4. So lässt sich an dieser Stelle kein planarer Kontakt finden. Somit muss schrittweise eine Kollisionsprüfung entlang der Rotationsachse durchgeführt werden, bis der Dübel die Bounding Box der Baugruppe verlassen hat. Aufgrund der daraus resultierenden langen Strecken erfolgen auch die verlängerten Rechenzeiten. Eine Verkürzung dieser Analyse ist allerdings nicht möglich, da immer auch die Möglichkeit in Betracht gezogen werden muss, ein Bauteil, wie hier den Dübel, schon vorher zu montieren.

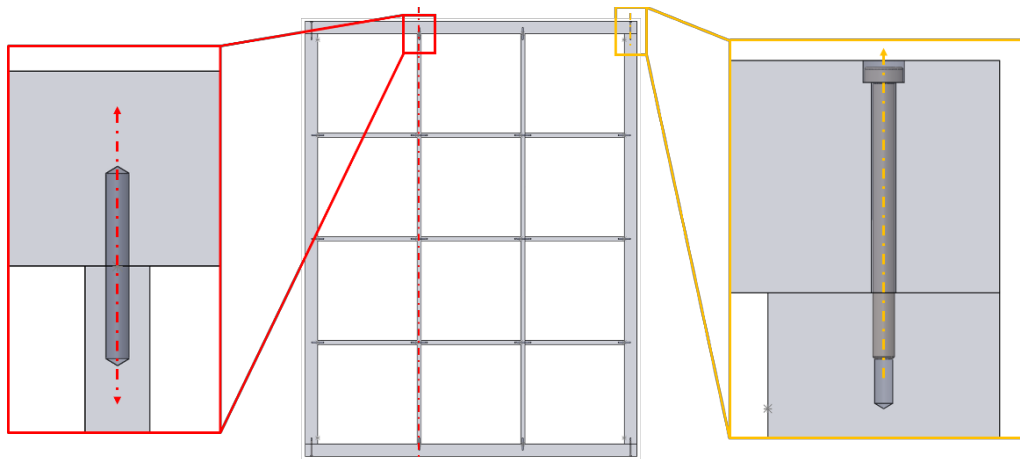


Abbildung 5.4 Montage der Dübel und Schrauben im Anwendungsfall KALLAX

In einer weiteren Untersuchung wurde der Einfluss sämtlicher Features auf die Rechenzeit untersucht. Hierfür wurde das MCAB mit der modifizierten Schaltleiste K5-2B00DE.480 der ELABO GmbH (im Folgenden Schaltleiste genannt) aus Abbildung 5.5a verglichen. Hierzu wurde die Schaltleiste so angepasst, dass sie die gleiche Anzahl an Bauteilen und vergleichbare Distanzen der Montagepfade aufweist. Jedoch befinden sich in der Baugruppe der Schaltleiste deutlich mehr Features, was wiederum zu einer erheblich längeren Rechenzeit von 1.166 s führte. Die Untersuchungen ergaben, dass die über sechs Mal längere Zeit auf die erheblich größere Anzahl an Low-level Features zurückzuführen ist. Abbildung 5.5b veranschaulicht hierbei eine der vier Schuko-Steckdosen mit den aufwendigen Konturen. So werden die allermeisten dieser Low-level Features zwar nicht für die Bildung von höherwertigen High-level Features benötigt, dennoch werden alle ausgelesen und in Arrays zwischengespeichert. In einer nachfolgenden Analyse werden diese Features mit den Features der anderen Bauteile abgeglichen. Basierend auf diesem Vorgehen steigt die Rechenzeit mit jeder weiteren Schuko-Steckdose deutlich an. Weiterhin verdeutlicht auch ein Blick auf das einstufige Stirnradgetriebe (ESG), dass die Anzahl der Bauteile einen weniger großen Einfluss auf die Rechenzeit hat, als eine große Anzahl von Features. So weist das ESG etwa ein Drittel mehr Bauteile auf im Vergleich zur Schaltleiste, kann jedoch mit kürzeren Rechenzeiten ausgewertet werden. Somit ist zu schlussfolgern, dass neben einer aufwendigen Kollisionsanalyse auch die Anzahl der enthaltenen Features einen direkten Einfluss auf die Rechenzeit hat.

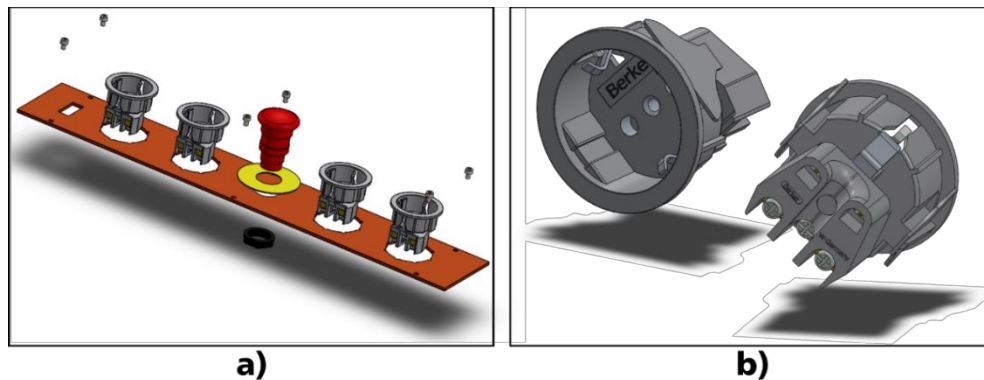


Abbildung 5.5 Modifizierte Schaltleiste der ELABO GmbH (a) und Schuko-Steckdosen (b)

In der Summe zeigt sich, dass die Anzahl der Bauteile nur einen bedingten Einfluss auf die benötigte Rechenzeit hat. Der Großteil ist auf die Auswertung und Systematisierung der Features und der nachfolgenden Kollisionsanalyse zurückzuführen. Je mehr Features eine Baugruppe enthält und umso komplexer eine Kollisionsanalyse durchgeführt werden muss, desto stärker steigt die Rechenzeit an. Allerdings kann diese auch mit jedem identifizierten Normteil wieder gesenkt werden.

5.2 Experteninterviews mit Dienstleistern für technische Dokumentationen

Bisher hat sich gezeigt, dass alle generierten Montagesequenzen stabil durchführbar sind und den definierten Kriterien entsprechen. Im zweiten Schritt der Validierung geht es schließlich um die Beurteilung der Optimierungskriterien und Montagesequenzen durch Experteninterviews mit Fachleuten für technische Dokumentationen. Hierfür wurden zwei Geschäftsführer von Montagedokumentationsagenturen dazu befragt, wie deren Vorgehen für die Bestimmung von Montagesequenzen aussieht und welche Kriterien hierauf einen Einfluss nehmen. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass keine Aufzeichnungen der Interviews zitiert werden dürfen, da diese sensible Kundeninformationen beinhalten. Die professionelle Beurteilung der Optimierungskriterien und Montagesequenzen wurde daher anhand der qualitativen Ergebnisse des MCAB und des ESG vorgenommen.

5.2.1 Montagesequenz des MCAB

Abbildung 5.6 veranschaulicht den Aufbau, die Montagesequenz und die extrahierten Features des MCAB. So wird ersichtlich, dass alle Features, Normteile und Werkzeuge korrekt extrahiert und zugewiesen werden konnten. Weiterhin ist die Montagesequenz gültig und realisierbar. Die vollständig generierte Montageanleitung zum MCAB findet sich im Anhang 9.4. Im Folgenden werden die relevanten Montageprozesse hervorgehoben und beschrieben.

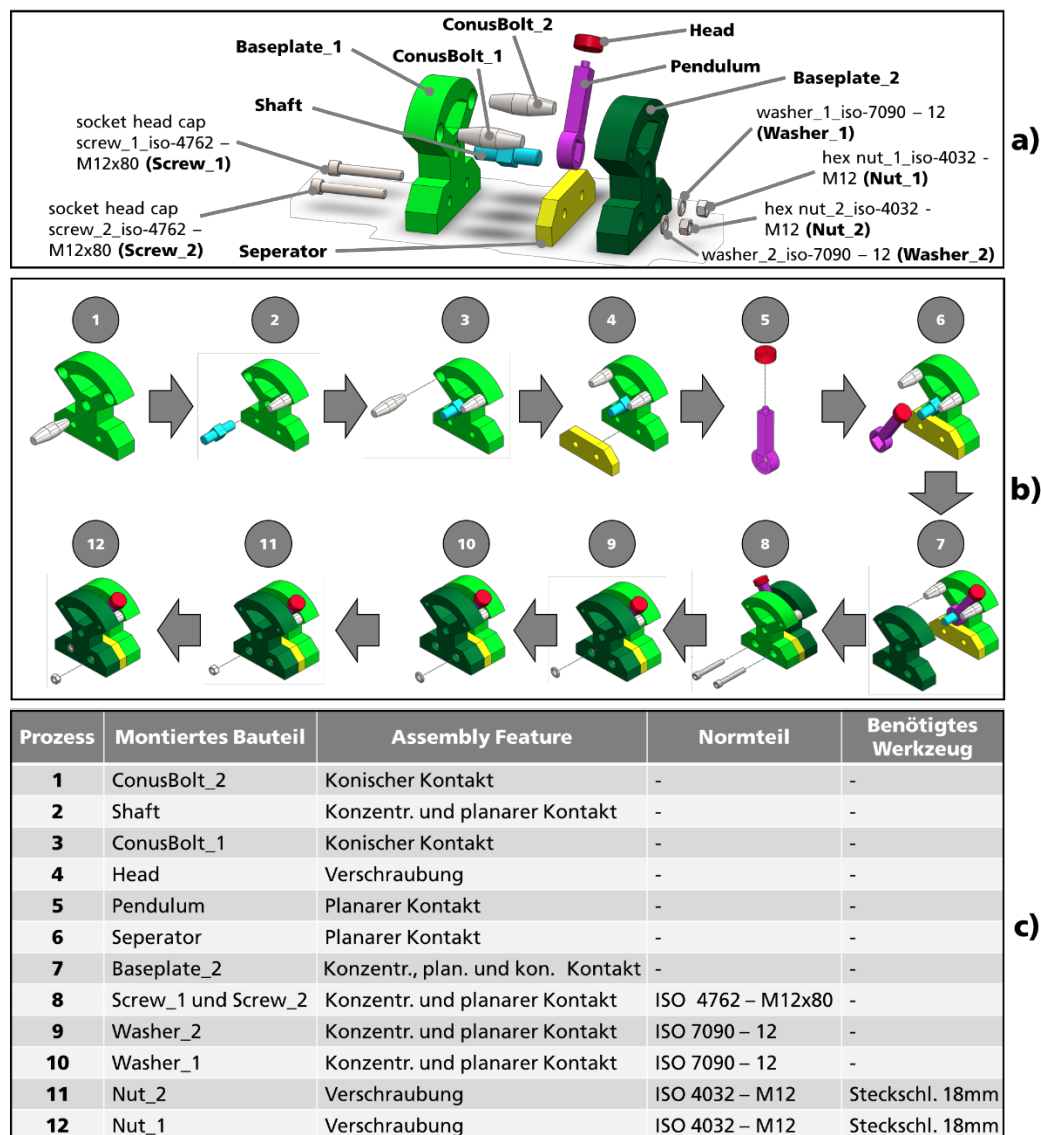


Abbildung 5.6 MCAB: Aufbau (a), Montagesequenz (b) und Features (c)

So ist zu erkennen, dass in den Prozessen 1-3 zwischen den beiden „ConusBolts“ der „Shaft“ eingesetzt wird. Dies geht darauf zurück, dass diese nicht als Gleichteil erkannt werden und die Änderung vom „ConusBolt_2“ über den „Shaft“ zum „ConusBolt_1“ am geringsten ist. Weiterhin ist hervorzuheben, dass die Vormontage des „Head“ an das „Pendulum“ korrekt als Unterbaugruppe in Prozess 5 erkannt wird. Im anschließenden Prozess wird die Unterbaugruppe in die Hauptbaugruppe eingesetzt. Ergänzend werden in Prozess 8 die beiden genormten Schrauben erkannt und zusammengefasst montiert. Ein Unterbaugruppen-Basisteil wird hierbei korrekterweise nicht bestimmt.

In den nachfolgenden Prozessen werden schließlich auch die Unterlegscheiben nacheinander in Prozess 9 und 10 montiert. Selbiges trifft auch für die Muttern in Prozess 11 und 12 zu. Anders als die Schrauben werden diese Prozesse allerdings nicht zusammengefasst, sondern als getrennte Prozesse betrachtet. Eine Besonderheit ist hierbei, dass nicht erst eine Unterlegscheibe und anschließend eine fixierende Mutter gesetzt werden. Dies würde zwar zu einer höheren Stabilität führen, allerdings auch zu einem weiteren Werkzeugwechsel, wenn im nächsten Schritt erst wieder die zweite Unterlegscheibe gesetzt werden müsste. Da die Stabilität der Baugruppe jedoch nicht kritisch ist, wird daher erst die zweite Unterlegscheibe gesetzt, um in den Prozessen 11 und 12 schließlich die Muttern ohne einen zusätzlichen Werkzeugwechsel zu fixieren.

5.2.2 Montagesequenz des ESG

Anders als das MCAB wurden in das ESG einige Herausforderungen integriert (Abbildung 5.7). So handelt es sich beispielsweise bei der „Welle_2_vormontiert“ um eine bereits montierte Welle. Somit muss das System die identifizierten Assembly Features innerhalb der Welle unterdrücken, aber dennoch als Unterbaugruppe identifizieren. Damit haben ausschließlich die teilzylindrischen Kontakte an den Radialkugellagern und dem Gehäuse einen Einfluss auf die Montage. Daher wird diese Welle auch korrekterweise im vormontierten Zustand in Prozess 1 in das Gehäuse gesetzt.

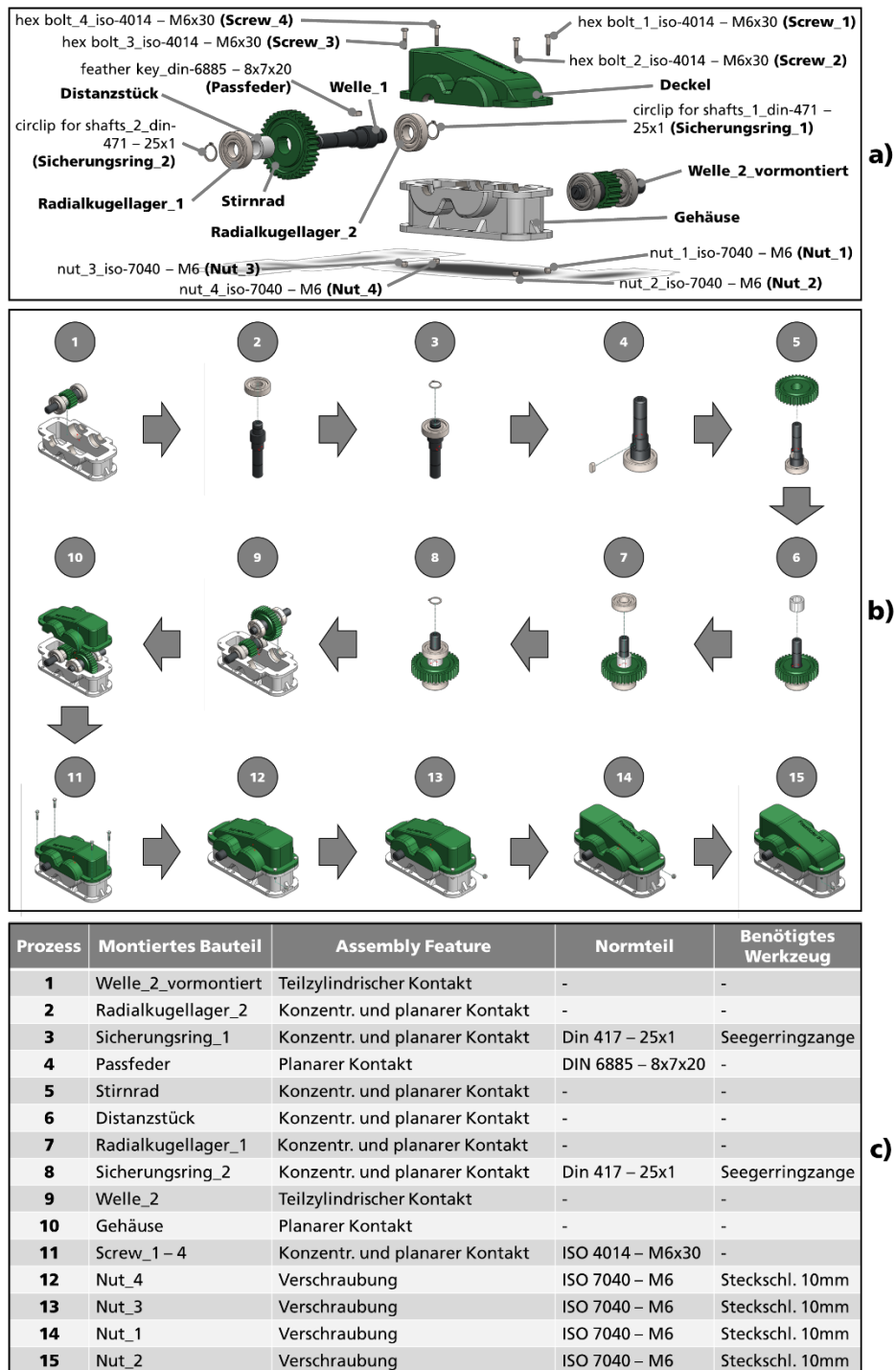


Abbildung 5.7 ESG: Aufbau (a), Montagesequenz (b) und Features (c)

Die zweite Welle „Welle_1“ hingegen muss als unmontierte Unterbaugruppe erkannt und erst vormontiert werden. Eine Montage direkt im Gehäuse ist nicht möglich. Prozess 2-9 in Abbildung 5.7b veranschaulicht die korrekt extrahierte Montagesequenz. Weiterhin

bedarf diese Welle auch einer zusätzlichen Rotation um 180°, damit beide Seiten der Welle montiert werden können. So wird in Prozess 2 zuerst das Radialkugellager eingesetzt und in Prozess 3 fixiert, um es im Anschluss stabil drehen zu können. In Prozess 5-9 wird schließlich der Rest der Welle montiert und fixiert.

Weiterhin war auch ein entscheidender Fall bei der Montage von „Nut_2“ in Prozess 14 bzw. 15 zu beobachten. So würde nach der Montage von „Nut_3“ zwar „Nut_2“ näher liegen als „Nut_1“, jedoch führte die Reorientierung der Baugruppe in Prozess 14 dazu, dass nun „Nut_1“ näher an der ursprünglichen Position von „Nut_3“ lag. Somit wird „Nut_1“ vor „Nut_2“ montiert. Dies ist allerdings nur durch eine Neuausrichtung aufgrund einer Reorientierung möglich, da hier gezielt die Position und nicht nur der Winkel abgefragt wird.

Insgesamt zeigt sich, dass alle relevanten Features, Normteile und Werkzeuge korrekt extrahiert und den Bauteilen zugewiesen wurden. Weiterhin ist auch die Montagesequenz valide, stabil und ausführbar (Abbildung 5.7b und c).

5.2.3 Stefan Knipf Techn. Dokumentation/Techn. Grafik GmbH

Das erste Interview wurde bei der „Stefan Knipf Techn. Dokumentation/Techn. Grafik GmbH“ mit dem geschäftsführenden Gesellschafter Marco Hauk am 23.09.2020 durchgeführt. Das Unternehmen hatte zum Zeitpunkt des Interviews acht Mitarbeiter. Zu den Kernkompetenzen zählt die Anfertigung von Explosionszeichnungen für die Ersatzteildokumentationen sowie die Erstellung von Aufbauanleitungen.

Die Anfertigung einer Aufbauanleitung mit ca. 15 Seiten braucht nach Hauk zwei bis drei Arbeitswochen und wird in Microsoft Word oder Adobe InDesign erstellt. Die Erstellung

der Aufbauanleitungen findet hierbei parallel zum Entwicklungsprozess statt, um möglichst früh einen Marktstart zu realisieren, da die Anleitung hierfür essenziell ist (siehe Kapitel 4.5). Da auch bei Dienstleistungsunternehmen für technische Dokumentationen das 3D-Modell der Ausgangspunkt der Planung ist, ist es nicht selten, dass die 3D-Modelle nicht auf dem neusten Stand sind und Abbildungen später nachgebessert werden müssen. Jedoch soll es sich bei diesen Änderungen oftmals nur um „*nicht montagerelevante Kleinigkeiten*“ handeln, sodass auch nicht immer alle Änderungen später noch eingepflegt werden. Laut Hauk ist dies „*auch nicht unbedingt notwendig, da lediglich der Kern der Anleitung nachvollziehbar sein muss*“.

Die Montagesequenz ist hierbei abhängig vom „*Bauchgefühl des Redakteurs*“, so Hauk, und damit von dessen Erfahrung. Als Lösungsansatz wird auf das konventionelle Vorgehen „*Assembly-by-Disassembly*“ zurückgegriffen. Somit arbeitet sich die Redaktion digital von der zusammengebauten Baugruppe zunehmend durch alle Bauteile. Allerdings besteht besonders bei großen Baugruppen eine Gefahr, dass Bauteile vergessen bzw. Abhängigkeiten übersehen werden können. Zu den häufigsten Fehlern bei der Bestimmung der Montagesequenz zählt daher die Unzugänglichkeit von Bauteilen und Werkzeugen. Ein akribisches Vorgehen und eine genaue Prüfung sind somit essenziell.

Als wichtigstes Merkmal für eine Montagesequenz wurde die Stabilität und der „*Richtungswechsel*“ bzw. die Reorientierung genannt. Dies geht darauf zurück, dass für jede Abbildung in der Anleitung ein Richtungswechsel in Form einer neuen Perspektive dargestellt werden muss. Weiterhin ist nur eine stabile Montagesequenz valide. Somit sind beide genannten Optimierungskriterien auch in dieser Arbeit vertreten. Weiterhin äußerte sich Hauk sehr positiv zu den enthaltenen Optimierungskriterien aus Kapitel 4.4.1 und ist der Meinung, dass, wenn alle genannten Kriterien in der Bildung der Montagesequenz enthalten sind, dies weit über die aktuellen Möglichkeiten hinausgehe. Besonders deshalb, da die Bestimmung der Montagesequenz heute noch sehr fehleranfällig ist und nur rein subjektiv von den Redakteurinnen und Redakteuren durchgeführt werden kann.

Eine Änderung der Montagesequenz ist auch nur mit einem erhöhten Aufwand zu bewältigen, da die manuell erstellten Abbildungen sehr spezifisch sind und nicht automatisch aktualisiert werden können. Somit wird versucht, die Perspektiven immer gleich zu halten, um den Aufwand zu reduzieren.

Nichtsdestotrotz wurden zwei Verbesserungsvorschläge für die Bildung der Montagesequenz des MCAB geäußert. So würde die Identifikation und Zusammenfassung von Gleichteilen, wie der „ConusBolts“, zu einer geringeren Anzahl an Montageprozessen und auch zu weniger benötigten Abbildungen führen. Weiterhin wurde auch die Wahl der „Baseplate_1“ als Basisbauteil in Frage gestellt. So weisen beide enthaltenen „Baseplates“ das gleiche Potenzial als Basisbauteil auf. Wäre allerdings „Baseplate_2“ das Basisbauteil, so müsste die Reorientierung in Prozess 8 in Abbildung 5.6b nicht stattfinden, da es sich schon in dieser Position befinden würde. Somit würde eine Reorientierung bzw. eine Perspektive weniger benötigt. Die Prozesse 1-7 und 9-12 könnten analog durchgeführt werden.

5.2.4 CARSTENS + PARTNER GmbH & Co. KG

Das zweite Interview wurde mit Siegfried Siegel, dem Geschäftsführer und Leiter der technischen Redaktion der „CARSTENS + PARTNER GmbH & Co. KG“, am 28.09.2020 durchgeführt. Das Unternehmen beschäftigt 30 Mitarbeiter/-innen und der Unternehmensfokus liegt auf der Erstellung von Betriebsanleitungen sehr großer Anlagen. Die Dokumentationen der Anlagen umfassen hierbei grundsätzlich mehrere 100 Seiten.

Die von Siegel vorgeführten Dokumentationen beinhalteten wenige große Bilder und viele stichpunktartige Beschreibungen. Die Bilder sind eine Mischung aus 2D-CAD-Bildschirmaufnahmen und realen Fotos der Anlage. Dies geht darauf zurück, dass große Anlagen sehr vielen Änderungen unterliegen, die nicht großartig dokumentiert oder

visualisiert werden. Als Referenz wurde hierfür die Dokumentation über das Ablassen von Kühlflüssigkeiten vorgeführt. Die Dokumentationen sind hierbei webbasiert und für den Aufruf auf Tablets optimiert.

Ausgangspunkt der Dokumentation sind in der Regel neutrale Datenformate wie STEP (ISO 10303) mit einem eingeschränkten Informationsgehalt. Sie verhelfen zu einem ersten Überblick. Ein weiterer, von Siegel genannter Vorteil ist, dass Redakteurinnen und Redakteure mit den 3D-Modellen effizienter planen können, da diese nicht zwingend vor Ort sein müssen. Dies ist besonders bei Anlagen in Reinräumen von großer Bedeutung, wobei auch angemerkt wurde, dass es vor fünf Jahren noch kaum brauchbare 3D-Modelle von großen Anlagen gab und die Planung mit 3D-Modellen auch heute noch recht abstrakt ist und oftmals einer intensiven Einarbeitung bedarf.

Das vorgestellte Vorgehen wurde von Siegel als wegweisend und nachvollziehbar beschrieben. Die Kriterien, so der Experte, gehen weit über den Umfang hinaus und auch die Montagesequenz ist absolut in Ordnung. Auf die Hinweise von Hauk (Kapitel 5.2.3) wurde anonym hingewiesen, allerdings ist diese Betrachtung nach Siegel zu aufwendig und findet in der Montageplanung großer Anlagen keine Beachtung. *„Wenn eine Prozessbeschreibung bei einer Anlage machbar ist, ist diese gut. Die Effizienz kann hierbei nicht berücksichtigt werden“*, so Siegel. Nichtsdestotrotz wird vom Interviewpartner ein großes Potenzial bei der Planung kleinerer Baugruppen gesehen.

Ein weiteres Thema war die automatisch generierte Montageanleitung (siehe Kapitel 4.5). So müssen besonders für größere Anlagen die Betriebsanleitungen nach von der EU vorgeschriebenen Maschinenrichtlinien erstellt werden. Demgemäß enthalten diese auch ergänzende Anweisungen, wie zur Risikobeurteilung oder Informationen zur Entsorgung. Technische Redakteurinnen und Redakteure kennen diese Maschinenrichtlinien und Normen genauestens. Jedoch zweifelt Siegel die Möglichkeit an, diese Informationen

automatisch aus einem 3D-Modell zu extrahieren. Dieser Umfang geht weit über den Fokus dieser Arbeit hinaus und wird daher nicht weiterverfolgt.

5.3 Abgleich mit Montagedokumentationen für Konsumgüter

Im dritten Schritt sollen nun reale Baugruppen von dem entwickelten System analysiert werden. Die generierte Montagesequenz soll anschließend mit der realen Montagesequenz aus der Montageanleitung verglichen werden. Die Notwendigkeit der Montageanleitung wird in § 434 BGB Abs. 2 Satz 2 geregelt. Diese Klausel geht hierbei auf das historische Ereignis zurück, dass die damalige Inter IKEA Systems B.V. (im folgenden IKEA) zwar preisgünstige Möbel vertrieb, jedoch ihren Kunden keine adäquate Montageanleitungen zur Verfügung stellten. Nach Klage der Kunden wurde diese sogenannte „IKEA-Klausel“ erlassen, die vorschreibt, dass Konsumgüter ohne eine korrekte Montageanleitung als fehlerhaft anzusehen sind. Heute sind Montageanleitungen von IKEA dafür bekannt, besonders einfach und verständlich zu sein und mithilfe einer Ikonographie Montagevorgänge simpel darstellen zu können. Aus diesem Grund wurden zwei der beliebtesten IKEA Möbelstücke ausgesucht, um diese Arbeit weiter zu validieren. Abbildung 5.8 veranschaulicht die originalen Produkte aus dem Online-Katalog und die detailgetreuen Nachkonstruktionen des Beistelltischs LACK und des Regals KALLAX.

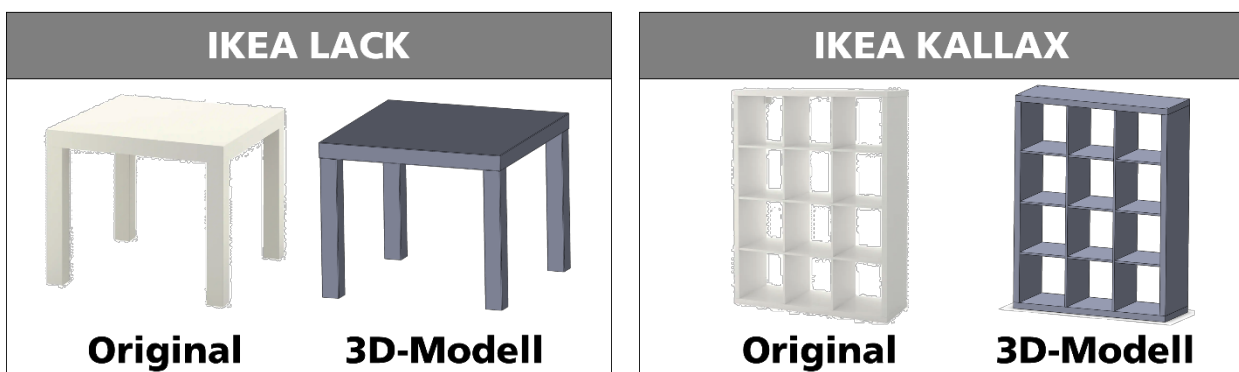


Abbildung 5.8 Vergleich von LACK und KALLAX mit dem 3D-Modell (IKEA 2021a, 2021b)

5.3.1 IKEA LACK Beistelltisch

Schon Tabelle 5.1 zeigte, dass LACK am schnellsten berechnet wurde. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass für jedes Bauteil nur eine Montagerichtung untersucht werden muss und auch die Anzahl der Features aufgrund der glatten, ebenen Flächen gering ist. Abbildung 5.9 veranschaulicht, dass eine stabile und valide Montagesequenz gebildet werden konnte.

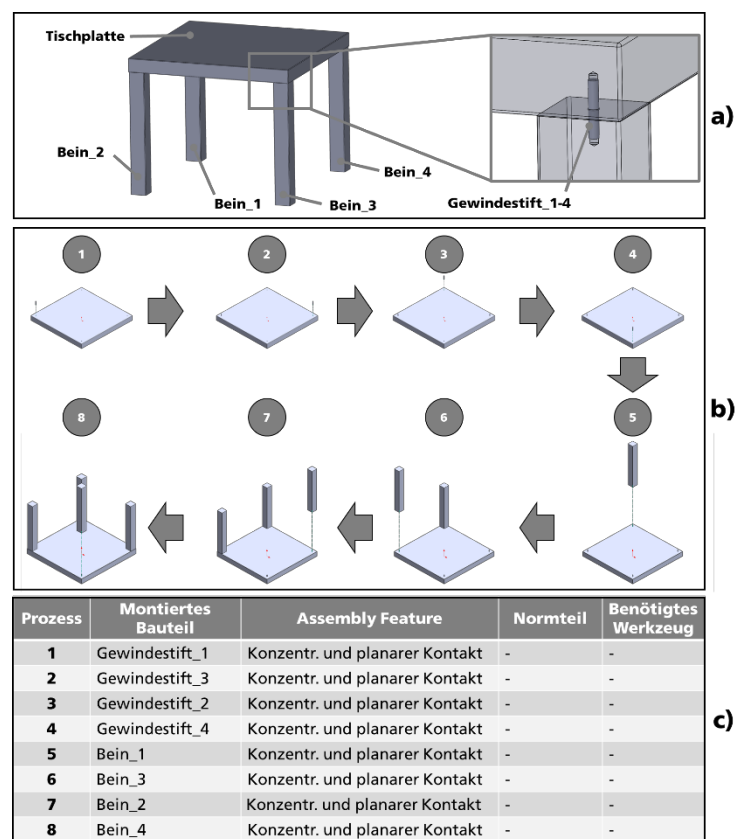


Abbildung 5.9 LACK: Aufbau (a), Montagesequenz (b) und Features (c)

Als Basisteil wurde die Tischplatte identifiziert und auf den Kopf gedreht. Dies ist besonders interessant, da dies auch der Fall in der originalen Montageanleitung ist (Abbildung 5.10). Weiterhin ist zu erkennen, dass erst alle Gewindestifte in die Tischplatte gesetzt wurden, bevor die Tischbeine montiert wurden. Dies ist damit zu erklären, dass das Setzen der Beine als Aufgabenwechsel identifiziert wurde.

Ein weiterer Faktor ist die Montage der Gewindestifte und Beine über Kreuz. Es wäre zu erwarten, dass die Montage im oder gegen den Uhrzeigersinn durchgeführt wird, doch werden im Rahmen der Optimierung nur die Winkel erhoben. Weiterhin befindet sich die Baugruppe nach der Montage der Gewindestifte in einem stabilen Zustand, sodass eine ergänzende Fixierung nicht notwendig ist. Darauf basierend unterscheidet sich der Algorithmus für den nächsten Montageschritt gegenüber der geringsten Winkeländerung.

Ein Vergleich mit der originalen LACK-Montageanleitung in Abbildung 5.10 verdeutlicht, dass die Montagereihenfolge der Gewindestifte und Beine keinen Einfluss auf die Montage hat. Weiterhin ist hervorzuheben, dass die komplette LACK-Montageanleitung aus nur einer einzigen Anweisung besteht.

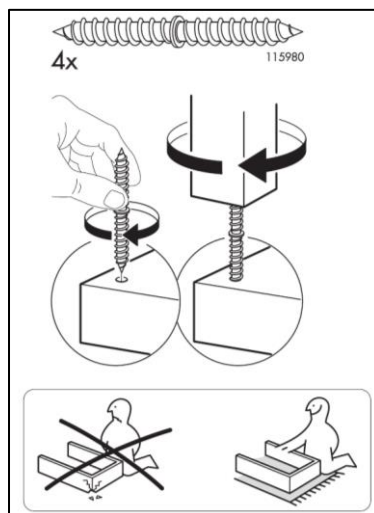


Abbildung 5.10 Montageanleitung des LACK (IKEA 2021a)

5.3.2 IKEA KALLAX Regal

In Summe weist das Regal KALLAX 55 Bauteile auf: 8x lange Schrauben, 32x Dübel, 8x kurze Bretter, 3x lange Bretter, 2x Seitenteile, 2x Kopf- bzw. Fußteil (Wandbefestigung und Filzaufkleber werden nicht betrachtet). In der originalen Montageanleitung werden

diese Prozesse in 11 Prozessschritten zusammengefasst (Abbildung 5.11), wobei sich die Prozessschritte 2 und 3 je drei Mal wiederholen, da diese immer ein langes Brett nach zwei kurzen Brettern einsetzen.

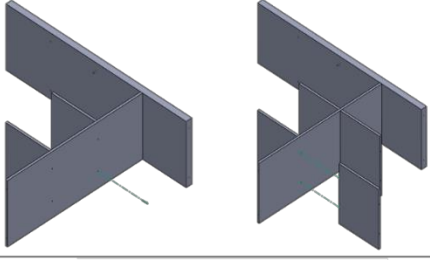
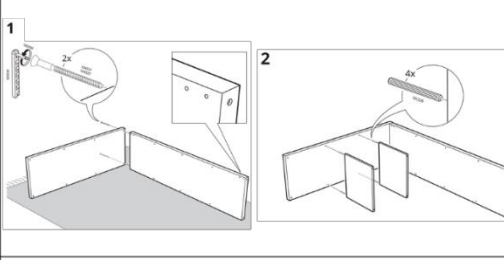
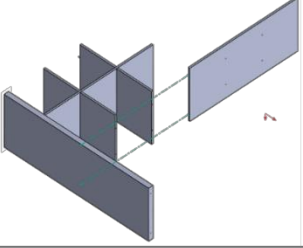
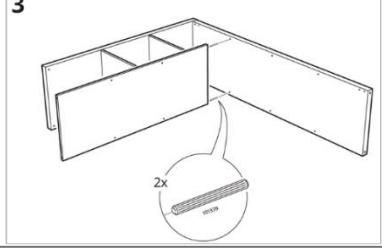
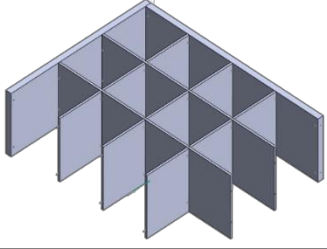
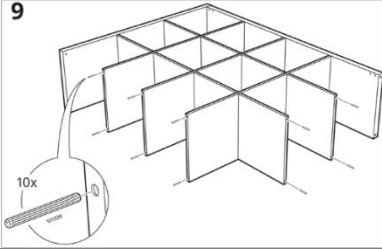
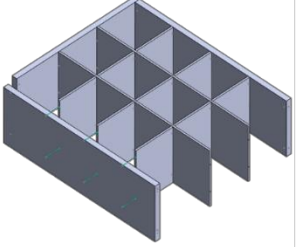
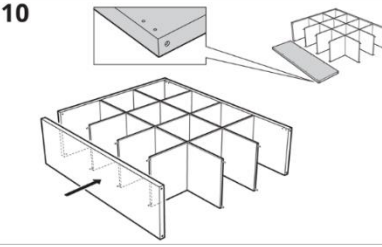
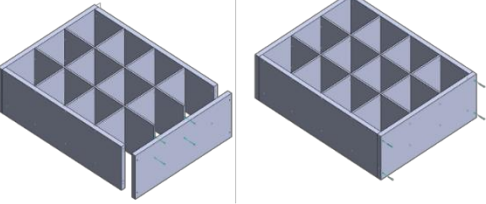
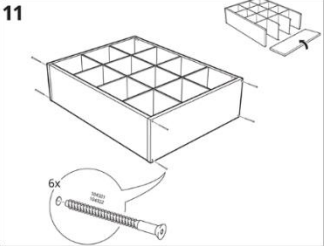
Automatisch generierte Montagesequenz	Vergleich mit Original KALLAX-Anleitung
	
	
	
	
	

Abbildung 5.11 Vergleich der automatisch generierten Montagesequenz mit der originalen KALLAX-Anleitung von IKEA (2021b)

Wie in den Visualisierungen in Abbildung 5.11 der originalen Montageanleitung ersichtlich ist, werden in den einzelnen Montageschritten stets mehrere Prozessschritte durchgeführt. Dies ist zwar für eine Montageanleitung angemessen, allerdings nicht für die Analyse bzw. Planung von Montageprozessen. In diesem Fall ist es zwingend erforderlich, sämtliche Prozesse gesondert zu betrachten. Weiterhin können auch Automatisierungspotenziale nur über die Auswertung einzelner Prozesse bestimmt werden.

Nichtsdestotrotz werden zum Vergleich die Prozessschritte der automatisch generierten Montagesequenz aggregiert verglichen und die Unterschiede hervorgehoben. So wird ersichtlich, dass die Grundschriffe identisch sind. Zu Beginn wird bei beiden Anleitungen ein Kopf- bzw. Fußteil ausgewählt. Danach folgt bei der Original-Anleitung ein Seitenteil, wohingegen die generierte Montagesequenz zunächst eines der langen Bretter wählt und darauf aufbaut (Abbildung 5.11). Anschließend werden bei beiden Montagesequenzen im Wechsel die kurzen und langen Bretter gesetzt, bis der Grundaufbau mit beiden Seitenteilen steht. In den letzten Schritten werden bei beiden Montageanleitungen schließlich das zweite Kopf- bzw. Fußteil montiert und mit den Schrauben fixiert. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die von IKEA verwendeten Schrauben nicht als Normteile erkannt werden konnten, da diese nicht als Normteile im Algorithmus hinterlegt waren. Aus diesem Grund folgte eine nachträgliche Änderung der Schrauben, was letztendlich zu einer korrekten Aggregation der Schrauben im finalen Schritt führte.

Weiterhin werden auch die Dübel in der generierten Montagesequenz an den richtigen Stellen erkannt und gemeinsam eingesetzt, sodass es zu keinem Aufgabenwechsel kommt. Zwar ist hier, wie bei dem Anwendungsfall LACK, eine auf den ersten Blick außergewöhnliche Montagefolge der Dübel zu erkennen. Allerdings ist dies wieder auf die Fokussierung der Montagewinkel zurückzuführen.

Im Grundsatz zeigte sich, dass die automatisch generierte Montagesequenz der originalen Montageanleitung entspricht, stabil und valide ist. Verbesserungspotenzial zeigte sich besonders bei großen Baugruppen im Aggregieren von Gleichteilen. Zwar wurden diese aufgrund der Minimierungsfaktoren nacheinander gesetzt, allerdings nicht gemeinsam visualisiert. Weiterhin wäre auch bei LACK ein Einbezug der Montagedistanzen für die Darstellungsform von Vorteil.

5.4 Kritische Würdigung der Ergebnisse

Die Anwendungsfälle zeigten, dass das System valide ist und stabile Montagesequenzen liefert. Jedoch kristallisierte sich ein Verbesserungspotenzial heraus. So ist vor allem die Erkennung von Gleichteilen als weiterer Optimierungsfaktor hervorzuheben. So betonte Hauk, dass die „ConusBolts“ des MCAB zusammengefasst werden sollten, um weniger Perspektiven zu benötigen. Dasselbe träfe in gleicher Weise für die Gewindebolzen und Dübel der IKEA Anwendungsfälle LACK und KALLAX zu.

Ein zweites ergänzendes Optimierungskriterium ist die Erfassung der Distanzen bei der Montage aus derselben Richtung. Zwar würde die Erkennung von Gleichteilen schon die identifizierte Problemstellung lösen, jedoch wäre damit ein präziseres Lösungssystem zu erwarten. Auf diese Weise könnte auch die Betrachtung der Reorientierung in Bezug auf das Basisteil, wie von Hauk erwähnt, erfasst werden.

Ergänzend wurde das vorgestellte Vorgehen auch dahingehend untersucht, auf welche Weise die Konstrukteurinnen und Konstrukteure zu einer besseren Lösung beitragen können. So zeigte sich insbesondere, dass Konstruktionsfehler wie Überschneidungen zu fehlerhaften Ergebnissen und Abbrüchen führten. Eine manuelle Anpassung der 3D-Modelle ist nicht notwendig, wenn diese nach den gängigen Konstruktionsstandards erstellt worden sind. Hilfreich ist es, wenn die Konstruktionen eine geringe Anzahl von

Features aufweisen, um die Rechenzeit nicht zu stark zu belasten. Allerdings hängen diese Kriterien meist von der erforderlichen Geometrie ab und nicht vom Design. Eine weitere Unterstützung wäre die Verknüpfung des Schriftfeldes aus der technischen Zeichnung mit dem 3D-Modell. So können durch das Auslesen des Schriftfeldes Informationen wie Drehmoment, Toleranzen oder zulässige Oberflächengenauigkeit ermittelt werden. Allerdings entspricht dies nicht dem Konstruktionsstandard. Weiterhin wurden nur die in Kapitel 3 (Abbildung 3.10) vorgestellten Normteile in dieser Arbeit betrachtet. Durch eine Integration weiterer Normteile oder weiterer Schrauben kann das System weiter optimiert werden.

Als Einschränkung des Systems kann zudem die Rechenleistung genannt werden. So führte schon die KALLAX-Baugruppe mit 55 Bauteilen zu $\sim 1.27 \cdot 10^{73}$ (55!) möglichen Montagesequenzen und einer Rechenzeit von über 12 Stunden. Weiterhin konnten in dieser Arbeit nicht modellierte Montageprozesse, wie Klebprozesse, Sichtprüfungen oder Verkabelungen, nicht betrachtet werden, da diese grundsätzlich nicht in einem 3D-Modell hinterlegt werden. Weiterhin ist anzumerken, dass äußere Umgebungsvariablen, wie Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit, nicht mit aufgenommen werden können, da auch diese nicht aus einem 3D-Modell ersichtlich werden.

Dessen ungeachtet bewies sich in Summe, dass die ausgearbeiteten Optimierungskriterien und -funktionen immer zu vorteilhaften und durchführbaren Montagesequenzen führten und extrahierte Kriterien weit über den Stand der Technik hinaus betrachtet werden konnten. So zeigte sich, dass die generierten Montagesequenzen vergleichbar mit den Ergebnissen professioneller Agenturen sind. So konnte bei der Expertenbefragung festgestellt werden, dass aufgrund des gewaltigen Lösungsraums nicht alle aufgeführten Optimierungskriterien von Experten beachtet werden können. Lediglich für die Darstellungsform der Montageanleitungen sollte das Kriterium der Prozessaggregation mitaufgenommen werden. Damit liefern die Erkenntnisse dieser Umsetzung neue Einsichten in der Planung von Montagesequenzen aus 3D-Modellen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Noch vor knapp zehn Jahren wurde in Arbeiten, wie zum Beispiel von Leu et al. (2013), die Bildung von Montagesequenzen bei $n!$ Möglichkeiten und fehlendem Expertenwissen als unmöglich beschrieben. Doch durch die Kombination einer ausgefeilten Methodik mit der zunehmenden Rechenleistung und der CAD-Systeme ergibt sich heute eine andere Sichtweise auf dieses Themengebiet.

6.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, wie Montageplaner/-innen schon frühzeitig bei der Planung von Montagesequenzen unterstützt werden können. Hierzu wurde geprüft, wie montagerelevante Informationen aus einem 3D-Modell extrahiert werden können, um mit diesen schließlich automatisiert Montagesequenzen zu generieren. Darauf aufbauend wurden zwei Kernfragen adressiert:

- Welche Montageinformationen können automatisiert aus 3D-Modellen extrahiert werden?
- Wie können aus diesen Informationen Montagesequenzen generiert, bewertet und optimiert werden?

Als Ausgangspunkt der Untersuchung wurde ein interner Ansatz entwickelt, der über eine API direkt auf das CAD-System zugreift und die relevanten Informationen am Ort der Entstehung abgreift. Neutrale bzw. externe Formate haben sich hierfür, aufgrund der Konvertierungsverluste wichtiger relevanter Informationen, nicht behaupten können. Weiterhin wurde ein Ansatz entwickelt, um durch die Kombination niederrangiger Low-level Features in einem CAD-System höherrangige High-level Features zu gewinnen. So konnten mithilfe dieses Vorgehens sämtliche relevanten Assembly Features aus dem 3D-Modell extrahiert werden (Abbildung 6.1). Ergänzend dazu konnten auch Kontaktinformationen, wie der Montagewinkel oder die Montagerichtung, auf Basis

geometrischer Rahmenbedingungen errechnet werden. Neben den direkten Montageinformationen wurden zudem auch Bauteileigenschaften, wie die Bounding Box, Normteile oder das Bauteilgewicht, aus dem 3D-Modell extrahiert. Weiterhin wurden alle identifizierten Normteile den passenden Werkzeugen zugeordnet.

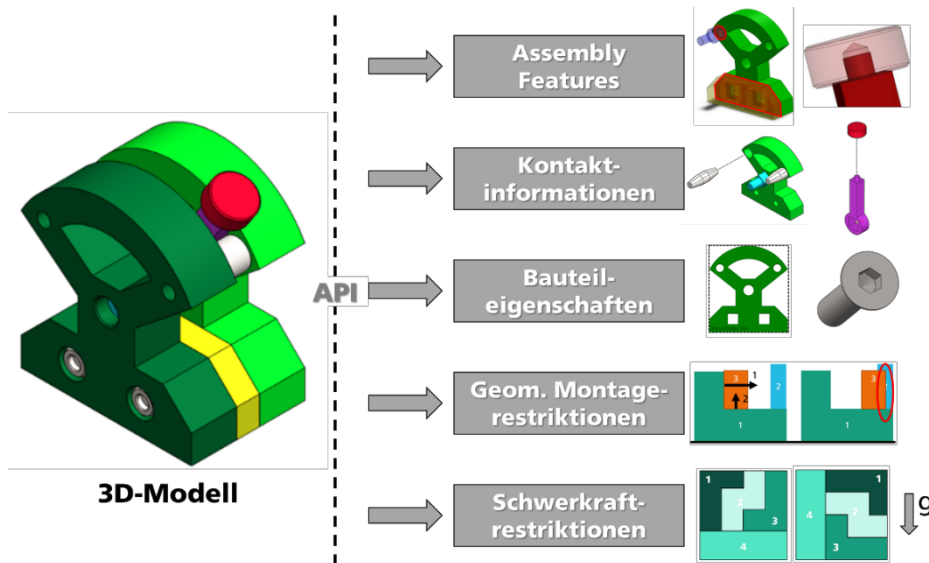


Abbildung 6.1 Extrahierte Informationen aus einem 3D-Modell

In einer auf diesen Informationen aufbauenden Analyse zeigte sich, dass weitere Informationen erforderlich sind. Aus diesem Grund wurde das Vorgehen um eine neue Form der Kollisionsanalyse erweitert. Sie wurde auf Basis von Features durchgeführt. Auf diese Weise konnten Fixierungen in der Analyse unterdrückt und die benötigten geometrischen Montagerestriktionen identifiziert werden. Weiterhin wurden, darauf aufbauend, die Einflüsse der Schwerkraft als Schwerkraftrestriktionen erkannt.

Basierend auf diesen in Abbildung 6.1 extrahierten Informationen wurden schließlich Optimierungskriterien abgeleitet. Hierbei unterscheiden sich diese Kriterien in zwingend erforderliche, wie die Werkzeugzugänglichkeit, und optimierbare, wie die Minimierung der Werkzeugwechsel. Diese zuletzt genannten Kriterien wurden in einer Optimierungsfunktion zusammengefasst und als Wegfindungsproblem modelliert.

Die Validierung erfolgte in drei Stufen. So wurde zu Beginn eine quantitative Auswertung durchgeführt. Hierbei wurden die Einflussfaktoren auf die Rechenzeit bzw. Auswertung identifiziert und weiter untersucht. Anschließend wurde in einem zweiten Schritt eine qualitative Expertenbefragung mit Montageplanern aus professionellen Montagedokumentationsagenturen durchgeführt. Das Resultat dieser Befragung war, dass die befragten Montageplaner aufgrund des gewaltigen Lösungsraums heute nicht in der Lage sind, die identifizierten Optimierungskriterien in vollem Umfang zu beachten. Dadurch entspricht eine durchführbare Montagesequenz mit möglichst wenigen Prozessschritten schon den heutigen Standards. In einer dritten Validierung wurden die generierten Montagesequenzen mit Montageanleitungen realer Produkte verglichen. So konnte festgestellt werden, dass die generierten Montagesequenzen im Kern den realen Montageanleitungen entsprechen, jedoch auch ein Verbesserungspotenzial offenbaren. So würde die Identifikation und Aggregation von Gleichteilen zu weniger Montageprozessen und einem besseren Verständnis führen.

In Summe wurde bewiesen, dass Montageplaner/-innen schon in der Konstruktionsphase durch die automatisierte Planung von Montagesequenzen unterstützt werden können. Ein Blick auf das Dilemma der Konstruktion in Abbildung 1.1 zeigt, dass durch die Automatisierung der Planung der Kostenentstehung entgegengewirkt werden kann. Damit kann das Ziel von „Automating the Automation“ in der Montageplanung unterstützt werden.

6.2 Ausblick und weiterführende Anknüpfungspunkte

Im Laufe der Entwicklung ergaben sich im Rahmen diverser Forschungsprojekte unterschiedliche Anknüpfungspunkte zur Nutzung der entwickelten Technologie. Im Folgenden werden diese weiterführenden Anknüpfungspunkte kurz beschrieben und ein Ausblick in die Zukunft gegeben.

6.2.1 Automatische Generierung von AR-Werkerassistenzsystemen

Eine der weiterführenden Arbeiten geht hierbei auf gemeinsame Forschungen am Fraunhofer IPA und dem Future Work Lab zurück (Neb et al. 2018; Neb et al. 2021a; Neb et al. 2021b; Neb et al. 2021c). Ziel der gemeinsamen Arbeiten ist es, die extrahierten Informationen aus dem 3D-Modell nicht nur für eine papierbasierte Montageanleitung zu nutzen, sondern daraus voll automatisiert Werkerassistenzsysteme zu generieren. Das Ziel dieser Werkerassistenzsysteme ist die schrittweise Unterstützung der Monteurinnen und Monteure beim Zusammenbau komplexer Baugruppen mithilfe der Augmented Reality (AR)-Technologie und unterschiedlicher Ausgabegeräte wie Tablets oder Datenbrillen. In der Vergangenheit stellten sich diese Montageassistenzen als sehr erfolgreich und effizient heraus (Patron 2005), allerdings ist deren Erstellung immer noch mit einem extremen Zeitaufwand bei der Erstellung verbunden. Durch eine automatische Generierung dieser intelligenten AR-Werkerassistenzsysteme kann die Technologie erstmals kostengünstig in der Produktion eingesetzt werden und damit flächendeckend genutzt werden. Zur Demonstration dieser Potenziale wurde im Future Work Lab ein Demonstrator dazu aufgebaut. Im Anhang 9.5 finden sich Bilder des Aufbaus.

6.2.2 Bestimmung von Automatisierungspotenzialen

Eine Möglichkeit zur Optimierung manueller Tätigkeiten wurde in Kapitel 6.2.1 vorgestellt. Allerdings bietet auch die Automatisierung von Montageprozessen ein erhebliches Potenzial. Jedoch liegt die erste Schwierigkeit der Automatisierung in der Bestimmung geeigneter Prozesse. So muss erhoben werden, wie Bauteile vereinzelt, gehandhabt, positioniert und gefügt werden müssen. Zur Beherrschung dieser Gesamtkomplexität wurde am Fraunhofer IPA die sogenannte Automatisierungspotenzialanalyse (APA) von Spingler et al. (2002) weiterentwickelt (Neb 2020). Mithilfe dieser Analyse kann systematisch bestimmt werden, welche Prozesse sich für eine Automatisierungslösung eignen oder ob eine Sonderentwicklung erforderlich ist. Bei einer

APA werden unterschiedliche geometrische, prozessuale und physikalische Eigenschaften der Bauteile abgefragt und in einem Fragebogen bewertet. Allerdings findet die APA bis heute rein manuell statt und es bedarf bereits bestehender manueller Montagelinien, um eine Untersuchung vorzunehmen. In Vorarbeiten am Fraunhofer IPA (Neb et al. 2020a; Neb 2020; Zinser 2020; Neb 2021) offenbarte sich das Potenzial, mithilfe der Systematisierung der extrahierten Features aus einem 3D-Modell den APA-Bogen automatisch zu befüllen. Der Bewertungsbogen der APA hierzu befindet sich in einer reduzierten Form im Anhang 9.6. Damit wäre eine Bestimmung des Automatisierungspotenzials schon während der Konstruktion möglich und Automatisierungslösungen könnten schon bei der Konstruktion einbezogen werden.

6.2.3 Programmierung von Robotern

Von der Optimierung manueller Montagen, über die automatisierte Bestimmung von Automatisierungspotenzialen zeichnet sich auch eine Möglichkeit ab, Roboterteilprogramme für Montageprozesse automatisiert zu generieren. So wird im Forschungsprojekt DeMoBat untersucht, wie die im Rahmen dieser Arbeit extrahierten Informationen aus 3D-Modellen dazu genutzt werden können, um Programmbausteine für Montageroboter automatisch zu generieren zu können. Ein Durchbruch in diesem Forschungsfeld würde dazu führen, dass in Zukunft Industrieroboter ohne Programmierkenntnisse in Betrieb genommen werden könnten. Die ersten Erkenntnisse zu diesem Forschungsvorhaben wurden von Beck et al. (2021) veröffentlicht.

6.2.4 Optimierung der Methodik durch künstliche Intelligenz

Die vorgestellte Methodik kommt besonders beim Umgang mit featurereichen Baugruppen an ihre Grenzen. Mithilfe von Ansätzen der künstlichen Intelligenz könnte dies schon im Vorfeld analysiert und gefiltert werden. So könnten Features ohne Montagebezug, wie beispielsweise in Schriftzügen, erkannt und unterdrückt werden und

so einen positiven Einfluss auch die Rechenzeit ausüben. Diese Funktion könnte sehr vorteilhaft durch die markanten Featureketten von ausgestellten oder extrudierten Schriften trainiert werden. Weiterhin kann durch einen Abgleich der geometrischen Featureketten auch Gleichteile erkannt werden. Ein regelbasierter Featureabgleich würde hierzu zu lange benötigen, da dieser die Features sämtlicher Bauteile vergleichen würde. Ein intelligentes Lösungsverfahren würde nur relevante bzw. ähnliche Featureketten miteinander vergleichen und damit deutlich effizienter arbeiten.

7 Summary

The aim of this work was to investigate how assembly planners can be supported in the planning of assembly sequences at an early stage. For this purpose, it was investigated how information can be extracted from a 3D model in order to generate assembly sequences automatically. Therefore, two core questions were clarified: Which assembly information can be extracted automatically from 3D models and how can assembly sequences be generated, evaluated, and optimized from this information? In this context, particular attention was also paid to the possibilities for further use and the limitations.

As a starting point of the investigation, an internal approach was chosen which directly accesses the CAD system via an API and picks up the relevant information at the point of origin. Neutral or external formats have not been able to meet expectations for this purpose due to the conversion losses of relevant information.

Furthermore, a novel approach was developed to gain high-level features by combining low-level features in a CAD system. Using this approach, all relevant assembly features could be extracted from the 3D model. In addition, contact information such as the assembly angle or the assembly direction could be calculated on the basis of various vectors.

In addition to the direct assembly information, part features, such as the bounding box, standard parts or the part weight, were also extracted from the 3D model. In addition, the appropriate tools were assigned to all identified standard parts.

In an analysis based on this information, however, it became apparent that further information was needed. For this reason, the procedure was extended to include a new form of collision analysis. This was carried out on the basis of assembly features. Thus,

fixations could be suppressed in the analysis and the required geometric assembly restrictions could be identified. Furthermore, based on this, the influences of gravity were also identified as gravity restrictions.

Finally, optimization criteria were derived. They were divided into mandatory criteria, such as tool accessibility, and optimizable criteria, such as minimization of tool changes. These criteria were finally combined in an optimization function and jointly modeled as a pathfinding problem.

The validation was done in three steps. In the beginning, a quantitative evaluation was carried out. Here, the factors influencing the computation time or evaluation were identified and further investigated. In a second step, a qualitative expert survey was conducted with assembly planners from professional assembly documentation agencies. The result of this survey was that assembly planners today are not in a position to fully observe the identified optimization criteria due to the enormous solution space. As a result, a feasible assembly sequence with as few process steps as possible already meets the requirements. In a third investigation, the generated assembly sequences were compared to assembly instructions for real products. It was found that the generated assembly sequences corresponded exactly to the real assembly instructions, but also revealed a potential for improvement. For example, the identification and aggregation of common parts would lead to fewer assembly processes and a better understanding.

Overall, it was proven that assembly planners can be supported by automated planning of assembly sequences already in the design phase. A look at the design dilemma in Figure 1.1 shows that automating planning, this can be used to counteract cost generation and thus provide a better opportunity to influence costs. Thus, the principle of "automating automation" can be integrated in assembly planning.

8 Literaturverzeichnis

Abdullah et al. 2019

Abdullah, Muhammad Arif; Ab Rashid, Mohd Fadzil Faisae; Ghazalli, Zakri, 2019. Optimization of Assembly Sequence Planning Using Soft Computing Approaches: A Review.

Archives of Computational Methods in Engineering **26** (2), S. 461–474

DOI: 10.1007/s11831-018-9250-y

Alfadhlani et al. 2019

Alfadhlani, Ma'ruf, Anas; Toha, Isa Setiasyah; Samadhi, T.M.A. Ari, 2019. Automatic Precedence Constraint Generation for Assembly Sequence Planning using a Three-Dimensional Solid Model.

International Journal of Technology **10** (2), S. 339

DOI: 10.14716/ijtech.v10i2.3064

Anderl et al. 2000

Anderl, Reiner; Trippner, Dietmar (Hrsg.), 2000.

STEP Standard for the Exchange of Product Model Data: Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP).

Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

ISBN 9783322890962

DOI: 10.1007/978-3-322-89096-2

Andre et al. 2017

Andre, Robert; Thomas, Ulrike, 2017.

Error robust and efficient assembly sequence planning with haptic rendering models for rigid and non-rigid assemblies.

In: *IEEE International Conference on Robotics and*

-
- Automation (ICRA)*, Singapore,
5/29/2017 - 6/3/2017, S. 1–7
DOI: 10.1109/ICRA.2017.8262698
- Bahubalendruni et al. 2016a** Bahubalendruni, Raju; Biswal, Bibhuti Bhusan, 2016. A review on assembly sequence generation and its automation.
Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science **230** (5), S. 824–838
DOI: 10.1177/0954406215584633
- Bahubalendruni et al. 2016b** Bahubalendruni, Raju; Biswal, Bibhuti Bhusan, 2016. Liaison concatenation – A method to obtain feasible assembly sequences from 3D-CAD product.
Sadhana **41** (1), S. 67–74
DOI: 10.1007/s12046-015-0453-8
- Baldwin et al. 1991** Baldwin, Daniel; Abell, Thomas; Lui, Man-Cheung; Fazio, Thomas de; Whitney, Daniel, 1991. An integrated computer aid for generating and evaluating assembly sequences for mechanical products.
IEEE Transactions on Robotics and Automation **7** (1), S. 78–94
DOI: 10.1109/70.68072
- Baranowski et al. 2014** Baranowski, Krzysztof; Koszałka, Leszek; Poźniak-Koszałka, Iwona; Kasprzak, Andrzej, 2014. Ant Colony Optimization Algorithm for Solving the Provider - Modified Traveling Salesman Problem.
In: Nguyen, Ngoc T.; Attachoo, Boonwat; Trawiński, Bogdan; Somboonviwat, Kulwadee (Hrsg.): *Intelligent*

information and database systems: 6th Asian conference, ACIIDS 2014, Bangkok, Thailand, April 7 - 9, 2014 ; proceedings, part I.

Cham: Springer, S. 493–502

ISBN 978-3-319-05475-9

DOI: 10.1007/978-3-319-05476-6_50

Bauernhansl 2020

Bauernhansl, Thomas (Hrsg.), 2020.

Management in der Produktion.

Berlin: Springer Vieweg.

ISBN 978-3-662-44537-2

DOI: 10.1007/978-3-662-44538-9

Beck et al. 2021

Beck, Joshua; Neb, Alexander; Barbu, Katharina, 2021.

Towards a CAD-based Automated Robot Offline-Programming Approach for Disassembly.

Procedia CIRP **104**, S. 1280–1285

DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.215

Bedeoui et al. 2019

Bedeoui, Akram; Hadj, Riadh Ben; Hammadi, Moncef; Trigui, Moez; Aifaoui, Nizar, 2019. Assembly sequence plan generation of heavy machines based on the stability criterion.

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **102** (9-12), S. 2745–2755

DOI: 10.1007/s00170-019-03359-0

Ben Hadj et al. 2015

Ben Hadj, Riadh; Trigui, Moez; Aifaoui, Nizar, 2015.

Toward an integrated CAD assembly sequence planning solution.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science **229**

(16), S. 2987–3001

DOI: 10.1177/0954406214564412

Bengel 2009

Bengel, Matthias, 2009. Model-based configuration - A workpiece-centred approach.

ASME/IFToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, S. 689–695

Bikas et al. 2016

Bikas, Charisis; Argyrou, Angelos; Pintzos, George; Giannoulis, Christos; Sipsas, Kostantinos; Papakostas, Nikolaos; Chryssolouris, George, 2016. An Automated Assembly Process Planning System.

Procedia CIRP **44**, S. 222–227

DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.085

Bin et al. 2009

Bin, Yuan; Wei, Xiong; Zu-wen, Wang, 2009.

STEP-Based Research and Realization on CAD Data Transformation for Virtual Assembly.

In: *Proceedings of the 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*, Los Angeles, California USA,

3/31/2009 - 4/2/2009, S. 707–710

DOI: 10.1109/CSIE.2009.492

Blum et al. 2004

Blum, Christian; Sampels, Michael, 2004. An Ant Colony Optimization Algorithm for Shop Scheduling Problems.

Journal of Mathematical Modelling and Algorithms **3** (3), S. 285–308

DOI: 10.1023/B:JMMA.0000038614.39977.6f

Böge et al. 2017

Böge, Alfred; Böge, Wolfgang (Hrsg.), 2017.
*Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und
Anwendungen der Maschinenbau-Technik.*
23., überarbeitete Auflage.
Wiesbaden: Springer Vieweg.
ISBN 9783658125288

Booch et al. 2005

Booch, Grady; Rumbaugh, James; Jacobson, Ivar,
2005.
*The unified modeling language user guide: Covers
UML 2; thoroughly updated, the ultimate tutorial to
the UML from the original designers.*
2. ed.
Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley.
Safari Books online.
ISBN 0321267974

Boothroyd et al. 2011

Boothroyd, Geoffrey; Dewhurst, Peter; Knight, Winston
A., 2011.
Product design for manufacture and assembly.
Third edition.
Boca Raton, London, New York: CRC Press.
Manufacturing engineering and materials processing
74.
ISBN 9781420089271

Bossmann 2007

Bossmann, Marc, 2007.
*Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der
integrierten Produktentstehung, Zugl.: Saarbrücken.*
Saarbrücken: Univ. des Saarlandes, Lehrstuhl für
Fertigungstechnik/CAM.

Schriftenreihe Produktionstechnik 38. Univ., Diss.,
2007.

ISBN 978-3-930429-67-7

DOI: 10.22028/D291-22397

Bourjault 1988

Bourjault, Alain, 1988.

Methodology of Assembly Automation: A New
Approach.

In: Radharamanan, R. (Hrsg.): *Robotics and Factories of
the Future '87: Proceedings of the Second International
Conference San Diego, California, USA July 28-31,
1987.*

Berlin, Heidelberg: Springer, S. 37–45

ISBN 978-3-642-73892-0

DOI: 10.1007/978-3-642-73890-6_6

Box et al. 1987

Box, George E. P; Draper, Norman Richard, 1987.

Empirical model-building and response surfaces.

New York: Wiley.

Wiley series in probability and mathematical statistics.

Applied probability and statistics.

ISBN 0471810339

Briceno et al. 2007

Briceno, Jose; Pochiraju, Kishore, 2007.

Automatic Disassembly Plan Generation from CAD
Assembly Models.

In: *2007 IEEE International Symposium on Assembly
and Manufacturing*, Ann Arbor, MI,

7/22/2007 - 7/25/2007, S. 64–69

DOI: 10.1109/ISAM.2007.4288450

- Briki 2019a** Briki, Iyed, 2019.
Analyse des Automatisierungspotentials durch das Auslesen von Assembly Features über die SOLIDWORKS API (Application Programming Interface).
Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Studienarbeit
- Briki 2019b** Briki, Iyed, 2019.
Automatische Analyse von 3D-CAD-Modellen auf Normen mithilfe eines neuronalen Netzes.
Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Masterarbeit
- Broy 2013** Broy, Manfred (Hrsg.), 2013.
Modellbasiertes Software und Systems Engineering als Element eines durchgängigen Systems Lifecycle Managements (SysLM): Berlin Heidelberg: Springer
ISBN 9783642369179
DOI: 10.1007/978-3-642-36917-9_5
- Choi et al. 2009** Choi, Young-Keun; Lee, Dong Myung; Cho, Yeong Bin, 2009. An approach to multi-criteria assembly sequence planning using genetic algorithms.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **42** (1-2), S. 180–188
DOI: 10.1007/s00170-008-1576-4
- Claeys et al. 2015** Claeys, Arno; Hoedt, Steven; Soete, Nicolas; van Landeghem, Hendrik; Cottyn, Johannes, 2015.
Framework for Evaluating Cognitive Support in Mixed Model Assembly Systems.

IFAC-PapersOnLine **48** (3), S. 924–929

DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.201

Clerc 2004

Clerc, Maurice, 2004.

Discrete Particle Swarm Optimization, illustrated by the Traveling Salesman Problem.

In: Onwubolu, Godfrey C.; Babu, B. V. (Hrsg.): *New Optimization Techniques in Engineering*.

Berlin, Heidelberg: Springer, S. 219–239

ISBN 978-3-642-05767-0

DOI: 10.1007/978-3-540-39930-8_8

Collins et al. 1985

Collins, K.; Palmer, A. J.; Rathmill, K.

The Development of a European Benchmark for the Comparison of Assembly Robot Programming Systems.

In: *Rathmill, MacConaill et al. (Hg.) – Robot Technology and Applications*, S. 187–199

DOI: 10.1007/978-3-662-02440-9_18

Costa et al. 2018

Costa, Carlos Miguel; Veiga, Germano; Sousa, Armando; Rocha, Luis; Oliveira, Eugenio; Lopes Cardoso, Henrique; Thomas, Ulrike, 2018.

Automatic generation of disassembly sequences and exploded views from solidworks symbolic geometric relationships.

In: *18th IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, Torres Vedras,

4/25/2018 - 4/27/2018, S. 211–218

DOI: 10.1109/ICARSC.2018.8374185

- Dartigues et al. 2007** Dartigues, Christel; Ghodous, Parisa; Gruninger, Michael; Pallez, Denis; Sriram, Ram, 2007. CAD/CAPP Integration using Feature Ontology.
Concurrent Engineering **15** (2), S. 237–249
DOI: 10.1177/1063293X07079312
- Das Wirtschaftslexikon 2015** Das Wirtschaftslexikon, 2015.
Konstruktion.
Verfügbar unter:
<http://www.daswirtschaftslexikon.com/d/konstruktion/konstruktion.htm#hwprod-k0204L5>
Zugriff am: 21.06.2021
- Delchambre 1990** Delchambre, Alain, 1990.
A pragmatic approach to computer-aided assembly planning.
In: *Proceedings / 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 13 - 18, 1990, Cincinnati, Ohio, USA*,
13-18 May 1990, S. 1600–1605
DOI: 10.1109/ROBOT.1990.126238
- Di Stefano et al. 2004** Di Stefano, Paolo; Bianconi, Francesco; Di Angelo, Luca, 2004. An approach for feature semantics recognition in geometric models.
Computer-Aided Design **36** (10), S. 993–1009
DOI: 10.1016/j.cad.2003.10.004

-
- Dini et al. 1992** Dini, Gino; Santochi, Marco, 1992. Automated Sequencing and Subassembly Detection in Assembly Planning.
CIRP Annals **41** (1), S. 1–4
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61140-8
- Dombrowski et al. 2013** Dombrowski, Uwe; Wagner, Tobias; Riechel, Christoph, 2013.
Concept for a Cyber-Physical Assembly System.
In: *2013 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, Xi'an, China, S. 293–296
DOI: 10.1109/ISAM.2013.6643461
- Duden 2022** Duden, 2022.
Methodik.
Verfügbar unter:
<https://www.duden.de/rechtschreibung/Methodik>
Zugriff am: 09.07.2022
- Ebinger et al. 2018** Ebinger, Timothy; Kaden, Sascha; Thomas, Shawna; Andre, Robert; Amato, Nancy M; Thomas, Ulrike, 2018.
A General and Flexible Search Framework for Disassembly Planning.
In: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, QLD, 5/21/2018 - 5/25/2018, S. 3548–3555
DOI: 10.1109/ICRA.2018.8460483

Ehrlenspiel 2003

Ehrlenspiel, Klaus, 2003.
*Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe,
Methodeneinsatz, Zusammenarbeit.*
2., überarb. Aufl.
München: Hanser.
ISBN 3446221190

Ehrlenspiel et al. 2014

Ehrlenspiel, Klaus; Kiewert, Alfons; Lindemann, Udo;
Mörtl, Markus, 2014.
*Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren:
Kostenmanagement bei der integrierten
Produktentwicklung.*
7. Aufl.
Berlin: Springer Vieweg.
ISBN 9783642419591
DOI: 10.1007/978-3-642-41959-1

Eigner et al. 2014

Eigner, Martin; Roubanov, Daniil; Zafirov, Radoslav,
2014.
Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung.
Berlin: Springer Vieweg.
ISBN 9783662438152
DOI: 10.1007/978-3-662-43816-9

Eng et al. 1999

Eng, Tiam-Hock; Ling, Zhi-Kui; Olson, Walter; McLean,
Chuck, 1999. Feature-based assembly modeling and
sequence generation.
Computers & Industrial Engineering **36** (1), S. 17–33
Verfügbar unter:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835298001065>
DOI: 10.1016/S0360-8352(98)00106-5

-
- Fazio et al. 1987** Fazio, Thomas de; Whitney, Daniel, 1987. Simplified generation of all mechanical assembly sequences. *IEEE Journal on Robotics and Automation* **3** (6), S. 640–658
DOI: 10.1109/JRA.1987.1087132
- Fechter 2021** Fechter, Manuel, 2022. *Entwicklung einer automatisierten Methode zur Gestaltung hybrider Montagearbeitsplätze unter Nutzung optimierter Ressourcenkombinationen*. Stuttgart: Fraunhofer IPA Stuttgart, Univ., Diss., 2021
Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 132.
DOI: 10.18419/opus-12099.
- Fechter et al. 2019** Fechter, Manuel; Neb, Alexander, 2019. From 3D product data to hybrid assembly workplace generation using the AutomationML exchange file format. *Procedia CIRP* **81**, S. 57–62
DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.011
- Feldmann et al. 2014** Feldmann, Klaus; Schöppner, Volker; Spur, Günter (Hrsg.), 2014. *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. München: Hanser.
ISBN 3446428275
- Feynman et al. 1997** Feynman, Richard Phillips; Leighton, Ralph; Hutchings, Edward (Hrsg.), 1997. *"Surely you're joking, Mr. Feynman!": Adventures of a curious character*. 1st pbk. ed.

New York: W.W. Norton.

ISBN 0393316041

Foith-Förster et al. 2019

Foith-Förster, Petra; Bauernhansl, Thomas, 2019.
Generic Production System Model of Personalized
Production.

MATEC Web of Conferences **301**, S. 19

DOI: 10.1051/mateconf/201930100019

Galaske 2019

Galaske, Nadia, 2019.

*Modellierung von Zusammenbaubedingungen zur
Reihenfolgebildung im cyber-physischen
Montagesystem.*

Darmstadt, Univ., Diss., 2019.

Aachen: Shaker Verlag.

Forschungsberichte aus dem Fachgebiet

Datenverarbeitung in der Konstruktion Band 63.

ISBN 9783844065237

GeoGebra 2021

GeoGebra, 2021.

Koordinatentransformation.

Verfügbar unter:

<https://www.geogebra.org/m/YCRPwsMH> (Zugriff:
27.07.2017).

Ghandi et al. 2015

Ghandi, Somayé; Masehian, Ellips, 2015. Review and
taxonomies of assembly and disassembly path planning
problems and approaches.

Computer-Aided Design **67-68**, S. 58–86

DOI: 10.1016/j.cad.2015.05.001

Göke 2019

Göke, Joshua Simon, 2019.

Analyse eines 3D Produktmodells in SolidWorks mittels einer Kollisionsanalyse und Auswertung der Montagekriterien.

Hannover, Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik, Masterarbeit

Grote et al. 2018

Grote, Karl-Heinrich; Bender, Beate; Göhlich, Dietmar; Dubbel, Heinrich (Hrsg.), 2018.

Taschenbuch für den Maschinenbau.

25., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage.

Berlin: Springer Vieweg.

ISBN 9783662548059

DOI: 10.1007/978-3-662-54805-9

Guo et al. 2016

Guo, Xiwang; Liu, Shixin; Zhou, Meng-Chu; Tian, Guangdong, 2016. Disassembly Sequence Optimization for Large-Scale Products With Multiresource Constraints Using Scatter Search and Petri Nets.

IEEE transactions on cybernetics **46** (11), S. 2435–2446

DOI: 10.1109/TCYB.2015.2478486

Hasan 2017

Hasan, Baha, 2017.

An Ontological Approach to support Knowledge Sharing between Product Design and Assembly Process Planning (APP).

Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.

Trita-MMK 11112017:14.

ISBN 9789177296461

- Hasan et al. 2014** Hasan, Baha; Onori, Mauro; Wikander, Jan, 2014. Assembly Features Utilization to Support Production System Adaptation.
In: Camarinha-Matos, Luis M.; Barrento, Nuno S.; Mendonça, Ricardo (Hrsg.): *Technological innovation for collective awareness systems: 5th IFIP WG 5.5/SOCOLNET Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, DoCEIS 2014, Costa de Caparica, Portugal, April 7 - 9, 2014*.
Heidelberg: Springer, S. 85–92
ISBN 978-3-642-54733-1
DOI: 10.1007/978-3-642-54734-8_10
- Hasan et al. 2016a** Hasan, Baha; Wikander, Jan, 2016. Product Feature Modelling For Integrating Product Design And Assembly Process Planning
DOI: 10.5281/ZENODO.1126818
- Hasan et al. 2016b** Hasan, Baha; Wikander, Jan; Onori, Mauro, 2016. Assembly Design Semantic Recognition Using SolidWorks-API.
International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 5 (4), 280-287.
DOI: 10.18178/ijmerr.5.4.280-287
- Hasan et al. 2017a** Hasan, Baha; Wikander, Jan, 2017. A Review on Utilizing Ontological Approaches in Integrating Assembly Design and Assembly Process Planning (APP).
International Journal of Mechanical Engineering **4** (11), S. 5–16
DOI: 10.14445/23488360/IJME-V4I11P102

Hasan et al. 2017b

Hasan, Baha; Wikander, Jan, 2017.

Features Extraction from CAD as a Basis for Assembly Process Planning.

In: Camarinha-Matos, Luis M.; Parreira-Rocha, Mafalda; Ramezani, Javaneh (Hrsg.): *Technological innovation for smart systems: 8th IFIP WG 5.5/SOCOLNET Advanced Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, DoCEIS 2017, Costa de Caparica, Portugal, May 3-5, 2017 ; proceedings.*

Cham: Springer-Verlag, S. 144–153

ISBN 978-3-319-56076-2

DOI: 10.1007/978-3-319-56077-9_13

Hassin et al. 2008

Hassin, Refael; Keinan, Ariel, 2008. Greedy heuristics with regret, with application to the cheapest insertion algorithm for the TSP.

Operations Research Letters **36** (2), S. 243–246

DOI: 10.1016/j.orl.2007.05.001

Heemskerk et al. 1989

Heemskerk, Cock; van Luttervelt, Remko, 1989. The Use of Heuristics in Assembly Sequence Planning.

CIRP Annals **38** (1), S. 37–40

DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62647-X

Hesse et al. 1992

Hesse, Wolfgang; Merbeth, Günter; Frölich, Rainer, 1992.

Software-Entwicklung: Vorgehensmodelle, Projektführung, Produktverwaltung.

München: Oldenbourg.

Handbuch der Informatik 5.3.
ISBN 3486206931

Heyn 1999

Heyn, Markus (Hrsg.), 1999.
*Methodik zur schnittstellenorientierten Gestaltung von
Entwicklungskooperationen*, Aachen, Technische
Hochschule, Dissertation, 1998.
Aachen: Shaker.
ISBN 3826547071

Hignasari et al. 2018

Hignasari, Virginayoga; Mahira, Eka Diana, 2018.
Optimization of Goods Distribution Route Assisted by
Google Map with Cheapest Insertion Heuristic
Algorithm (Cih).
SINERGI **22** (2), S. 132
DOI: 10.22441/sinergi.2018.2.010

Hold et al. 2017

Hold, Philipp; Erol, Selim; Reisinger, Gerhard; Sihn,
Wilfried, 2017. Planning and Evaluation of Digital
Assistance Systems.
Procedia Manufacturing **9**, S. 143–150
DOI: 10.1016/j.promfg.2017.04.024

Holle 2002

Holle, Wolfgang, 2002.
*Rechnerunterstützte Montageplanung:
Montageplanung und Simultaneous Engineering*.
München: Hanser.
ISBN 3446219862

-
- Homem de Mello et al. 1990** Homem de Mello, Luiz; Sanderson, Arthur, 1990. AND/OR graph representation of assembly plans. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* **6** (2), S. 188–199
DOI: 10.1109/70.54734
- Hsieh 2007** Hsieh, Fu-Shiung, 2007. Analysis of Flexible Assembly Processes Based on Structural Decomposition of Petri Nets. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* **37** (5), S. 792–803
DOI: 10.1109/TSMCA.2007.902651
- Hsu 2017** Hsu, Hsien-Pin, 2017. A Fuzzy Knowledge-Based Disassembly Process Planning System Based on Fuzzy Attributed and Timed Predicate/Transition Net. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* **47** (8), S. 1800–1813
DOI: 10.1109/TSMC.2016.2531659
- Hsu et al. 2010** Hsu, Yung-Yuan; Chen, Wen-Chin; Tai, Pei-Hao; Tsai, Yung, 2010. A Knowledge-based Engineering System for Assembly Sequence Planning. In: Hinduja, Srichand; Li, Lin (Hrsg.): *Proceedings of the 36th International MATADOR Conference: Held at the University of Manchester in July 2010*. London: Springer, S. 123–126
ISBN 978-1-84996-431-9
DOI: 10.1007/978-1-84996-432-6_28

Hu et al. 2020

Hu, Junyan; Niu, Hanlin; Carrasco, Joaquin; Lennox, Barry; Arvin, Farshad, 2020. Voronoi-Based Multi-Robot Autonomous Exploration in Unknown Environments via Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **69** (12), S. 14413–14423
DOI: 10.1109/TVT.2020.3034800

Huang et al. 2017

Huang, Weijun; Xu, Qinchao, 2017. Automatic generation and optimization of stable assembly sequence based on ACO algorithm. In: *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Takamatsu, Japan, 8/6/2017 - 8/9/2017, S. 2057–2062
DOI: 10.1109/ICMA.2017.8016135

Ibrahim et al. 2012

Ibrahim, Ismail; Yusof, Zulkifli; Nawawi, Sophan Wahyudi; Rahim, Muhammad Arif Abdul; Khalil, Kamal; Ahmad, Hamzah; Ibrahim, Zuwairie, 2012. A Novel Multi-state Particle Swarm Optimization for Discrete Combinatorial Optimization Problems. In: *2012 Fourth International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation (CIMSIM 2012)*, Kuantan, Malaysia, 9/25/2012 - 9/27/2012, S. 18–23
DOI: 10.1109/CIMSIm.2012.46

IEC 2019

IEC, 2019. IEC White Paper: Semantic interoperability: Challenges in the digital transformation age

IKEA 2021a

IKEA, 2021.

LACK: Beistelltisch, weiß 55 x 55 cm.

Verfügbar unter: [https://www.ikea.com/de/de/p/lack-beistelltisch-weiss-](https://www.ikea.com/de/de/p/lack-beistelltisch-weiss-30449908/?utm_source=google&utm_medium=surfaces&utm_campaign=shopping_feed&utm_content=free_google_shopping_clicks_Livingroomseating&gclid=CjwKCAjwy7CKBhBMEiwA0Eb7aoAHqz3RHgFsMHy-uoYrkZJEuWFb9Uo3mon5n06ltkrDdFvgfrcorRoC34MQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds)

[30449908/?utm_source=google&utm_medium=surfaces&utm_campaign=shopping_feed&utm_content=free_google_shopping_clicks_Livingroomseating&gclid=CjwKCAjwy7CKBhBMEiwA0Eb7aoAHqz3RHgFsMHy-uoYrkZJEuWFb9Uo3mon5n06ltkrDdFvgfrcorRoC34MQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds](https://www.ikea.com/de/de/p/lack-beistelltisch-weiss-30449908/?utm_source=google&utm_medium=surfaces&utm_campaign=shopping_feed&utm_content=free_google_shopping_clicks_Livingroomseating&gclid=CjwKCAjwy7CKBhBMEiwA0Eb7aoAHqz3RHgFsMHy-uoYrkZJEuWFb9Uo3mon5n06ltkrDdFvgfrcorRoC34MQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds) (Zugriff: 27.07.2017).

IKEA 2021b

IKEA, 2021.

KALLAX: Regal, weiß 112x147 cm.

Verfügbar unter: <https://www.ikea.com/de/de/p/kallax-regal-weiss-10409932/> (Zugriff: 27.07.2017).

Irfan et al. 2006

Irfan, Mohammad; Bohez, Erik; Hamidullah, 2006.
Assembly Features: Definition, Classification, and Instantiation.

In: *2006 International Conference on Emerging Technologies, Peshawar,*

11/13/2006 - 11/14/2006, S. 617–623

DOI: 10.1109/ICET.2006.335941

Jonas et al. 2000

Jonas, Christian; Reinhart, Gunther (Hrsg.), 2000.

Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen, München, Technische Universität, Dissertation, 2000.

München: Utz.

ISBN 3896758705

Kahl et al. 2016

Kahl, Felix; Rulhoff, Stefan; Stjepandić, Josip; Thatenhorst, Klaus, 2016. Agile Assembly Planning for Multi-Variant Production Based on 3D PDF. *Advances in Transdisciplinary Engineering* **3**, S. 249–254
DOI: 10.3233/978-1-61499-668-2-249

Kärcher et al. 2019

Kärcher, Susann; Görzig, David; Bauernhansl, Thomas, 2019.
Modeling Manual Assembly System to Derive Best Practice from Actual Data.
In: Ameri, Farhad; Stecke, Kathryn E.; Cieminski, Gregor von; Kiritsis, Dimitris (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. Towards Smart Production Management Systems*.
Cham: Springer International Publishing, S. 431–438
ISBN 978-3-030-29995-8
DOI: 10.1007/978-3-030-29996-5_50

Kardos et al. 2016

Kardos, Csaba; Kovács, András; Váncza, József, 2016.
Towards Feature-based Human-Robot Assembly Process Planning.
Procedia CIRP **57**, S. 516–521
DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.089

Kardos et al. 2017

Kardos, Csaba; Kovács, András; Váncza, József, 2017.
Decomposition approach to optimal feature-based assembly planning.
CIRP Annals **66** (1), S. 417–420
DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.002

-
- Kardos et al. 2018a** Kardos, Csaba; Váncza, József, 2018. Mixed-initiative assembly planning combining geometric reasoning and constrained optimization.
CIRP Annals **67** (1), S. 463–466
DOI: 10.1016/j.cirp.2018.04.034
- Kardos et al. 2018b** Kardos, Csaba; Váncza, József, 2018. Application of Generic CAD Models for Supporting Feature-based Assembly Process Planning.
Procedia CIRP **67**, S. 446–451
DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.240
- Kardos et al. 2020** Kardos, Csaba; Kovács, András; Váncza, József, 2020. A constraint model for assembly planning.
Journal of Manufacturing Systems **54**, S. 196–203
DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.11.007
- Kennedy et al. 1995** Kennedy, James; Eberhart, Russell, 1995. Particle swarm optimization.
In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 1942-1948, vol.4
DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968
- Kongar et al. 2006** Kongar, Elif; Gupta, Surendra M., 2006. Disassembly sequencing using genetic algorithm.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **30** (5-6), S. 497–506
DOI: 10.1007/s00170-005-0041-x

Kou et al. 2020

Kou, Xiaoxi; Cao, Yan; Wang, Qiangfeng; Qiao, Hu, 2020. Sub-assembly recognition algorithm and performance analysis in assembly sequence planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **107** (3-4), S. 971–981
DOI: 10.1007/s00170-019-04207-x

Kromrey 2002

Kromrey, Helmut, 2002.
Empirische Sozialforschung: Modelle und Methoden der standardisierten Datenerhebung und Datenauswertung.
10., vollständig überarbeitete Auflage.
Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
Uni-Taschenbücher 1040.
ISBN 9783322934635

Kubicek 1976

Kubicek, Herbert, 1976.
Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegtes Forschungsdesign als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung.
Berlin: Inst. für Unternehmensführung.
Arbeitspapier / Institut für Unternehmensführung im Fachbereich Wirtschaftswissenschaften der Freien Universität Berlin 16.
ISBN 9783883980164

Kuhn 2014

Kuhn, Thomas S., 2014.
Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen.
Zweite revidierte und um das Postskriptum von 1969 ergänzte Aufl., 24. Auflage.
Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft 25.

ISBN 9783518276259

Kumar et al. 2021

Kumar, Gulivindala Anil; Bahubalendruni, M.V.A., Raju; Vara, Prasad; Ashok, Dara; Sankaranarayananasamy, K., 2021. A novel geometric feasibility method to perform assembly sequence planning through oblique orientations.

Engineering Science and Technology

DOI: 10.1016/j.jestch.2021.04.013

Lau et al. 2005

Lau, Henry; Lee, Carmna; Jiang, Bernhard; Hui, Ik; Pun, Kit Fai, 2005. Development of a computer-integrated system to support CAD to CAPP.

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **26** (9-10), S. 1032–1042

DOI: 10.1007/s00170-004-2094-7

Lee et al. 1990

Lee, Sung; Shin, Yeony Gil, 1990.

Assembly planning based on subassembly extraction.

In: *Proceedings / 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 13 - 18, 1990, Cincinnati, Ohio, USA,*

13-18 May 1990, S. 1606–1611

DOI: 10.1109/ROBOT.1990.126239

Leu et al. 2013

Leu, Ming; ElMaraghy, Hoda; Nee, Andrew; Ong, Soh Khim; Lanzetta, Michele; Putz, Matthias; Zhu, Wenjuan; Bernard, Alain, 2013. CAD model-based virtual assembly simulation, planning and training.

CIRP Annals **62** (2), S. 799–822

DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.005

Li et al. 2009

Li, Xiuli; Zhang, Shuren, 2009.
Automatic assembly planning for virtual assembly.
In: *2009 International Conference on Mechatronics
and Automation*, Changchun, China,
8/9/2009 - 8/12/2009, S. 2234–2238
DOI: 10.1109/ICMA.2009.5246678

Li et al. 2013

Li, Mingyu; Wu, Bo; Yi, Pengxing; Jin, Chao; Hu,
Youmin; Shi, Tielin, 2013. An improved discrete
particle swarm optimization algorithm for high-speed
trains assembly sequence planning.
Assembly Automation **33** (4), S. 360–373
DOI: 10.1108/AA-07-2012-062

Liang et al. 2010

Liang, Yong-qiang; Zhu, Xiao-shu; Xie, Miao, 2010.
Improved chromosome encoding for genetic-
algorithm-based assembly sequence planning.
In: *2010 International Conference on Intelligent
Computing and Integrated Systems (ICISS 2010)*,
Guilin, China,
10/22/2010 - 10/24/2010, S. 35–39
DOI: 10.1109/ICISS.2010.5655004

Lieberman et al. 1977

Lieberman, Lauren; Wesley, Michael, 1977.
AUTOPASS: An Automatic Programming System for
Computer-Controlled Mechanical Assembly.
IBM Journal of Research and Development **21** (4),
S. 321–333
DOI: 10.1147/rd.214.0321

Lin et al. 2017

Lin, Y.; Yan-An, S., 2017.

Research on virtual maintenance disassembly sequence planning for weapons equipment.

In: *2017 3rd IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)*, S. 706–710

DOI: 10.1109/CCSSE.2017.8088025

Lindemann et al. 2006

Lindemann, Udo; Reichwald, Ralf; Zäh, Michael F. (Hrsg.), 2006.

Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion.

Berlin, Heidelberg: Springer.

ISBN 9783540255062

DOI: 10.1007/3-540-34274-5

Liu 2009

Liu, Ling (Hrsg.), 2009.

Encyclopedia of database systems.

New York, NY: Springer.

ISBN 978-0-387-35544-3

DOI: 10.1007/978-0-387-39940-9

Lotter et al. 2012

Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter, 2012.

Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis.

2. Aufl.

Berlin, Heidelberg: Springer.

ISBN 9783642290619

DOI: 10.1007/978-3-642-29061-9

- Lu et al. 2008** Lu, Cassie; Huang, H. Z.; Fuh, J. Y. H.; Wong, Y. S., 2008. A multi-objective disassembly planning approach with ant colony optimization algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* **222** (11), S. 1465–1474
DOI: 10.1243/09544054JEM1252
- Lu et al. 2016** Lu, Cong; Yang, Zhuo, 2016. Integrated assembly sequence planning and assembly line balancing with ant colony optimization approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **83** (1-4), S. 243–256
DOI: 10.1007/s00170-015-7547-7
- Lubell et al. 2013** Lubell, Joshua; Frechette, Simon P.; Lipman, Robert R; Proctor, Frederick M.; Horst, John A.; Carlisle, Mark; Huang, Paul J., 2013. *Model-based Enterprise Summit Report*: National Institute of Standards and Technology
DOI: 10.6028/NIST.TN.1820
- Lv et al. 2010** Lv, Hong-Guang; Lu, Cong, 2010. An assembly sequence planning approach with a discrete particle swarm optimization algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **50** (5-8), S. 761–770
DOI: 10.1007/s00170-010-2519-4

-
- Maaß et al. 2008** Maaß, Jochen; Molkenstruck, Sven; Thomas, Ulrike; Hesselbach, Jürgen; Wahl, Friedrich, 2008. Definition and execution of a generic assembly programming paradigm.
Assembly Automation **28** (1), S. 61–68
DOI: 10.1108/01445150810849028
- Mandolini et al. 2018** Mandolini, Marco; Favi, Claudio; Germani, Michele; Marconi, Marco, 2018. Time-based disassembly method: how to assess the best disassembly sequence and time of target components in complex products.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **95** (1-4), S. 409–430
DOI: 10.1007/s00170-017-1201-5
- Marian et al. 2003** Marian, Romeo; Luong, Lee; Abhary, Kazem, 2003. Assembly sequence planning and optimisation using genetic algorithms.
Applied Soft Computing **2** (3), S. 223–253
DOI: 10.1016/S1568-4946(02)00064-9
- Marinescu et al. 2009** Marinescu, Radu; Dechter, Rina, 2009. AND/OR Branch-and-Bound search for combinatorial optimization in graphical models.
Artificial Intelligence **173** (16-17), S. 1457–1491
DOI: 10.1016/j.artint.2009.07.003
- Masclé et al. 2008** Masclé, Christian; Zhao, Hong Ping, 2008. Integrating environmental consciousness in product/process development based on life-cycle thinking.
International Journal of Production Economics **112** (1), S. 5–17 DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.08.016.

- Mathew et al. 2010a** Mathew, Arun; Rao, Cen, 2010. A Novel Method of Using API to Generate Liaison Relationships from an Assembly.
Journal of Software Engineering and Applications **03** (02), S. 167–175
DOI: 10.4236/jsea.2010.32021
- Mathew et al. 2010b** Mathew, Arun; Rao, Cen, 2010. A CAD system for extraction of mating features in an assembly.
Assembly Automation **30** (2), S. 142–146
DOI: 10.1108/01445151011029772
- Miao et al. 2002** Miao, Huikang K.; Sridharan, Nandakumar; Shah, Jami J., 2002. CAD-CAM integration using machining features.
International Journal of Computer Integrated Manufacturing **15** (4), S. 296–318
DOI: 10.1080/09511920110077502
- Michniewicz et al. 2016** Michniewicz, Joachim; Reinhart, Gunther; Boschert, Stefan, 2016. CAD-Based Automated Assembly Planning for Variable Products in Modular Production Systems.
Procedia CIRP **44**, S. 44–49
DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.016
- Mok et al. 2001** Mok, Swee Mean; Ong, Kim; Wu, Chi-Haur, 2001. Automatic generation of assembly instructions using STEP.
In: *Proceedings / 2001 ICRA, IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, South Korea,

21-26 May 2001, S. 313–318

DOI: 10.1109/ROBOT.2001.932571

Morato et al. 2012

Morato, Carlos; Kaipa, Krishnanand; Gupta, Satyandra K., 2012.

Assembly Sequence Planning by Using Multiple Random Trees-based Motion Planning.

In: *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - 2012*, Chicago, Illinois, USA,

8/12/2012 - 8/15/2012, S. 1461–1471

DOI: 10.1115/DETC2012-71243

Neb 2019

Neb, Alexander, 2019. Review on Approaches to Generate Assembly Sequences by Extraction of Assembly Features from 3D Models.

Procedia CIRP **81**, S. 856–861

DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.213

Neb 2020

Neb, Alexander, 2020.

Automatisierungspotenziale: Mit der APA-App zum Expertenwissen: Webinarreihe : Robotic & Automation.

Verfügbar unter:

https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwimm4_60_3yAhVJ26QKHT5FBilQFnoECAMQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.cyberprotect-bw.de%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F06%2F2020.06.17_Automatisierungspotenziale-Mit-der-APA-App-zum-

Expertenwissen.pdf&usg=AOvVaw0ju779piuZxXoOlrkb
idRI (Zugriff: 27.07.2017).

Neb 2021

Neb, Alexander, 2021.

A novel approach to identify automation potentials of
assembly processes directly from CAD models.

In: *2021 International Conference on Electrical,
Computer, Communications and Mechatronics
Engineering (ICECCME)*, Mauritius,

10/7/2021 - 10/8/2021, S. 1–6

DOI: 10.1109/ICECCME52200.2021.9590897

Neb et al. 2018

Neb, Alexander; Strieg, Florian, 2018. Generation of
AR-enhanced Assembly Instructions based on Assembly
Features.

Procedia CIRP **72**, S. 1118–1123

DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.210

Neb et al. 2019

Neb, Alexander; Remling, Dominik, 2019.

Quantification and Evaluation of Automation Concepts
based on a Multi-Criteria Decision Analysis.

Procedia CIRP **84**, S. 624–629

DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.321

Neb et al. 2020a

Neb, Alexander; Schoenhof, Raoul; Briki, Iyed, 2020.
Automation Potential Analysis of Assembly Processes
based on 3D Product Assembly Models in CAD
Systems.

Procedia CIRP **91**, S. 237–242

DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.172

-
- Neb et al. 2020b** Neb, Alexander; Briki, Iyed; Schoenhof, Raoul, 2020. Development of a neural network to recognize standards and features from 3D CAD models. *Procedia CIRP* **93**, S. 1429–1434
DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.010
- Neb et al. 2020c** Neb, Alexander; Hitzer, Julian, 2020. Automatic generation of assembly graphs based on 3D models and assembly features. *Procedia CIRP* **88**, S. 70–75
DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.013
- Neb et al. 2021a** Neb, Alexander; Bauernhansl, Thomas, 2021. ARCaide – ein neues Montageplanungstool / ARCaide: a new tool for assembly planning - Automated generation of AR-based assembly instructions using CAD data. *wt Werkstattstechnik online* **111** (03), S. 98–101
DOI: 10.37544/1436-4980-2021-03-6
- Neb et al. 2021b** Neb, Alexander; Brandt, David; Rauhöft, Greg; Awad, Ramez; Scholz, Johannes; Bauernhansl, Thomas, 2021. A novel approach to generate augmented reality assembly assistance automatically from CAD models. *Procedia CIRP* **104**, S. 68–73
DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.012
- Neb et al. 2021c** Neb, Alexander; Brandt, David; Awad, Ramez; Heckelsmüller, Silvana; Bauernhansl, Thomas, 2021. Usability study of a user-friendly AR assembly assistance. *Procedia CIRP* **104**, S. 74–79
DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.013

Neb et al. 2021d

Neb, Alexander; Scholz, Johannes, 2021.
A Novel Approach to Generate Assembly Instructions
Automatically from CAD Models.
In: Weißgraeber, Philipp; Heieck, Frieder; Ackermann,
Clemens (Hrsg.): *Next Gen Mobility Production -
Sustainability via Reconfigurability*: Wiesbaden:
Springer Vieweg, S. 117–125
ISBN 978-3-662-62961-1
DOI: 10.1007/978-3-662-62962-8_14

Neb et al. 2021e

Neb, Alexander; Göke, Joshua, 2021. Generation of
assembly restrictions and evaluation of assembly
criteria from 3D assembly models by collision analysis.
Procedia CIRP **97**, S. 33–38
DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.201

Neuhausen 2001

Neuhausen, Jörn, 2001.
*Methodik zur Gestaltung modularer
Produktionssysteme für Unternehmen der
Serienproduktion*.
Aachen, RWTH Aachen, Dissertation. URN:
urn:nbn:de:hbz:82-opus-3081.

Norm ISO 10303-242

ISO 10303-242:2020.
*Industrial automation systems and integration —
Product data representation and exchange — Part 242:
Application protocol: Managed model-based 3D
engineering*.

Norm DIN 8580

DIN 8580:2003-09.
Fertigungsverfahren- Begriffe, Einteilung.

-
- Norm DIN 8593** DIN 8593:2003-09.
*Fertigungsverfahren Fügen- Teil_0: Allgemeines;
Einordnung, Unterteilung, Begriffe.*
- Norm DIN EN 20273** DIN EN 20273.
*DIN EN 20273:1992-02, Mechanische
Verbindungselemente; Durchgangslöcher für
Schrauben (ISO_273:1979); Deutsche Fassung
EN_20273:1991.*
- Norm DIN EN ISO 10642** DIN EN ISO 10642.
*DIN EN ISO 10642:2020-02, Mechanische
Verbindungselemente- Senkschrauben mit
Innensechskant mit reduzierter Belastbarkeit
(ISO_10642:2019); Deutsche Fassung
EN_ISO_10642:2019.*
- Norm DIN ISO 2936** DIN ISO 2936.
*DIN ISO 2936:2016-10, Schraubwerkzeuge-
Winkelschraubendreher für Schrauben mit
Innensechskant (ISO_2936:2014).*
- Norm VDI 2218** VDI 2218:2003-03.
*Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung -
Feature-Technologie.*
- Norm VDI 2860** VDI 2860:1990-05.
*Montage- und Handhabungstechnik;
Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen;
Begriffe, Definitionen, Symbole.*

- Ou et al. 2013** Ou, Li-Ming; Xu, Xun, 2013. Relationship matrix based automatic assembly sequence generation from a CAD model.
Computer-Aided Design **45** (7), S. 1053–1067
DOI: 10.1016/j.cad.2013.04.002
- Oussama et al. 2014** Oussama, Jaider; Abdelilah, Elmesbahi; Ahmed, Rechia, 2014. Manufacturing Computer Aided Process Planning For Rotational Parts. Part 1: Automatic Feature Recognition From STEP AP203 Ed. 2.
International Journal of Engineering Research and Applications **Vol. 4** (14)
- Pal et al. 2005** Pal, Pralay; Tigga, Anand Mukut; Kumar, Anant, 2005. Feature extraction from large CAD databases using genetic algorithm.
Computer-Aided Design **37** (5), S. 545–558
DOI: 10.1016/j.cad.2004.08.002
- Pan 2005** Pan, Chunxia, 2005.
Integrating CAD files and automatic assembly sequence planning.
DOI: 10.31274/rtd-180813-15396
- Pan et al. 2005** Pan, Chunxia; Smith, Shana Shiang-Fong; Smith, Greg, 2005. Determining Interference Between Parts in CAD STEP Files for Automatic Assembly Planning.
Journal of Computing and Information Science in Engineering **5** (1), S. 56–62
DOI: 10.1115/1.1861473

-
- Pan et al. 2006a** Pan, Chunxia; Smith, Shana Shiang-Fong; Smith, Greg, 2006. Automatic assembly sequence planning from STEP CAD files.
International Journal of Computer Integrated Manufacturing **19** (8), S. 775–783
DOI: 10.1080/09511920500399425
- Pan et al. 2006b** Pan, Chunxia; Smith, Shana Shiang-Fong, 2006. Case study: the impact of assembly reorientations on assembly time.
International Journal of Production Research **44** (21), S. 4569–4585
DOI: 10.1080/00207540500534413
- Pang et al. 2006** Pang, Yan; Nee, Andrew; Khim Ong, Soh; Yuan, Miaolong; Youcef-Toumi, Kamal, 2006. Assembly feature design in an augmented reality environment.
Assembly Automation **26** (1), S. 34–43
DOI: 10.1108/01445150610645648
- Patron 2005** Patron, Christian, 2005.
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung, München. Zugl.: München, Technische Universität, Diss., 2004.
Forschungsberichte iwB / Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München 190.
ISBN 3831604746

Patzak 1982

Patzak, Gerold, 1982.
Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken.
Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN 9783642818936
DOI: 10.1007/978-3-642-81893-6

Peltokoski et al. 2014

Peltokoski, Merja; Lohtander, Mika; Varis, Juha, 2014.
The role of Product Data Management (PDM) in engineering design and the key differences between PDM and Product Lifecycle Management (PLM).
The 1st PDM forum for Finland-Russia collaboration

Pfrommer et al. 2013

Pfrommer, Julius; Schleipen, Miriam; Beyerer, Jürgen, 2013.
PPRS: Production skills and their relation to product, process, and resource.
In: *2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2013)*, Cagliari, Italy,
9/10/2013 - 9/13/2013, S. 1–4
DOI: 10.1109/ETFA.2013.6648114

Pintzos et al. 2016

Pintzos, George; Triantafyllou, Christos; Papakostas, Nikolaos; Mourtzis, Dimitris; Chryssolouris, George, 2016. Assembly precedence diagram generation through assembly tiers determination.
International Journal of Computer Integrated Manufacturing **29** (10), S. 1045–1057
DOI: 10.1080/0951192X.2015.1130260

-
- Pohl et al. 2021** Pohl, Klaus; Rupp, Chris, 2021.
Basiswissen Requirements Engineering: Aus- und Weiterbildung nach IREB-Standard zum Certified Professional for Requirements Engineering Foundation Level.
5., überarbeitete und aktualisierte Auflage.
Heidelberg: dpunkt.verlag.
ISBN 9783864908149
- Popplestone et al. 1978** Popplestone, Robin; Ambler, Anthony; Bellos, Ioannis, 1978. RAPT: A language for describing assemblies.
Industrial Robot: 5 (3), S. 131–137
DOI: 10.1108/eb004501
- Prawel 2010** Prawel, David (Hrsg.), 2010.
Collaboration & Interoperability Market Report 2010
- Qiao et al. 2018** Qiao, Lihong; Qie, Yifan; Zhu, Zuowei; Zhu, Yixin; Zaman, Uzair Khaleeq; Anwer, Nabil, 2018. An ontology-based modelling and reasoning framework for assembly sequence planning.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **94** (9-12), S. 4187–4197
DOI: 10.1007/s00170-017-1077-4
- Rashid et al. 2012** Rashid, Mohd Fadzil Faisae; Hutabarat, Windo; Tiwari, Ashutosh, 2012. A review on assembly sequence planning and assembly line balancing optimisation using soft computing approaches.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **59** (1-4), S. 335–349
DOI: 10.1007/s00170-011-3499-8

Reimche 2017

Reimche, Maxim, 2017.

Industrie 4.0 - Bereit für die Massenfertigung individualisierter Produkte?

<https://www.industry-of-things.de/industrie-40-bereit-fuer-die-massenfertigung-individualisierter-produkte-a-646405/> (Zugriff: 27.07.2017).

Ropohl 2009

Ropohl, Günter, 2009.

Allgemeine Technologie : eine Systemtheorie der Technik.

Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

ISBN 9783866443747

Verfügbar unter:

<http://www.doabooks.org/doab?func=fulltext&rid=15084>

Rosenkrantz et al. 1977

Rosenkrantz, Daniel; Stearns, Richard; Lewis, Philip, 1977. An Analysis of Several Heuristics for the Traveling Salesman Problem.

SIAM Journal on Computing **6** (3), S. 563–581

DOI: 10.1137/0206041

Saleh et al. 2015

Saleh, Khairul; Helmi, Helmi; Prihandono, Bayu, 2015.

Penentuan Rute Terpendek Dengan Menggunakan Algoritma Cheapest Insertion Heuristic (Studi Kasus: Pt. Wicaksana Overseas International Tbk. Cabang Pontianak).

BIMASTER. **4** (3), S. 295–304

Schirrmeister et al. 2003

Schirrmeister, Elena; Warnke, Philine; Dreher, Carsten, 2003. Untersuchung über die Zukunft der Produktion in Deutschland, Sekundäranalyse von Vorausschau-

Studien für den europäischen Vergleich (Fraunhofer ISI, Karlsruhe)

Scholz 2020

Scholz, Johannes, 2020.

Generierung einer Montagedokumentation aus 3D-CAD-Modellen.

Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Masterarbeit

Schönhof et al. 2020

Schönhof, Raoul; Fechter, Manuel, 2020. Towards Automated Capability Assessment Leveraging Deep Learning.

Procedia CIRP **91**, S. 433–438

DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.195

Seeber et al. 2021

Seeber, Carsten; Albus, Marcel, Fechter, Manuel; Neb, Alexander; Yoshida, Satoshi, 2021. Automated 2D Layout Design of Assembly Line Workstations through Physical Principles.

Procedia CIRP **104**

DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.012

Seliger 2020

Seliger, Günther, 2020.

Montage und Demontage.

In: Bender, Beate; Göhlich, Dietmar (Hrsg.):

Anwendungen.

26., überarbeitete Auflage.

Berlin: Springer Vieweg, S. 987–995

ISBN 978-3-662-59712-5

DOI: 10.1007/978-3-662-59713-2_43

- Shah et al. 1988** Shah, Jami; Rogers, Mary, 1988. Functional requirements and conceptual design of the Feature-based Modelling System.
Computer-Aided Engineering Journal **5** (1), S. 9
DOI: 10.1049/cae.1988.0004
- Shah et al. 1993** Shah, Jami; Rogers, Mary, 1993. Assembly modeling as an extension of feature-based design.
Research in Engineering Design **5** (3-4), S. 218–237
DOI: 10.1007/BF01608364
- Smith 2004** Smith, Shana Shiang-Fong, 2004. Using multiple genetic operators to reduce premature convergence in genetic assembly planning.
Computers in Industry **54** (1), S. 35–49
DOI: 10.1016/j.compind.2003.08.001
- Smith et al. 2001** Smith, Shana Shiang-Fong; Smith, Greg; Liao, Xiaoyun, 2001. Automatic stable assembly sequence generation and evaluation.
Journal of Manufacturing Systems **20** (4), S. 225–235
DOI: 10.1016/S0278-6125(01)80043-1
- Smith et al. 2002** Smith, Greg; Smith, Shana Shiang-Fong, 2002. An enhanced genetic algorithm for automated assembly planning.
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing **18** (5-6), S. 355–364
DOI: 10.1016/S0736-5845(02)00029-7

-
- Spath et al. 2013** Spath, Dieter; Ganschar Oliver; Gerlach, Stefan; Hämmerle, Moritz; Krause, Tobias; Schlund, Sebastian (Hrsg.), 2013.
Studie „Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0“.
Fraunhofer IAO, Stuttgart
- Specker 2005** Specker, Adrian, 2005.
Modellierung von Informationssystemen: Ein methodischer Leitfaden zur Projektabwicklung.
2., überarbeitete und erweiterte Auflage.
Zürich: vdf Hochschulverlag AG.
vdf Wirtschaftsinformatik.
ISBN 3728129844
- Spingler et al. 2002** Spingler, Jochen; Beumelburg, Katharina, 2002.
Automatisierungspotential-Analyse.
wt Werkstattstechnik online (3), S. 62–64
- Spur et al. 1997** Spur, Günter; Krause, Frank-Lothar, 1997.
Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik.
München: Hanser.
ISBN 3446191763
- Stachowiak 1973** Stachowiak, Herbert, 1973.
Allgemeine Modelltheorie.
Wien: Springer.
ISBN 3211811060

Su 2007

Su, Qiang, 2007. Computer aided geometric feasible assembly sequence planning and optimizing.

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **33** (1-2), S. 48–57

DOI: 10.1007/s00170-006-0447-0

Sundaram et al. 2001

Sundaram, Sujay; Remmler, Ian; Amato, Nancy, 2001. Disassembly sequencing using a motion planning approach.

In: *Proceedings / 2001 ICRA, IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, South Korea,

21-26 May 2001, S. 1475–1480

DOI: 10.1109/ROBOT.2001.932818

Sung et al. 2001

Sung, Raymond C. W.; Corney, Jonathan R.; Clark, Doug E. R., 2001. Automatic Assembly Feature Recognition and Disassembly Sequence Generation.

Journal of Computing and Information Science in Engineering **1** (4), S. 291–299

DOI: 10.1115/1.1429931

Tao et al. 2017

Tao, Songqiao; Hu, Min, 2017. A contact relation analysis approach to assembly sequence planning for assembly models.

Computer-Aided Design and Applications **14** (6), S. 720–733

DOI: 10.1080/16864360.2017.1287674

Thomas et al. 2003

Thomas, Ulrike; Barrenscheen, Mark; Wahl, Friedrich, 2003.

Efficient assembly sequence planning using

stereographical projections of C-space obstacles.
In: *From assembly and disassembly of manufactured products to the design and manufacturing of micromachines*, Besancon, France,
10-11 July 2003, S. 96–102
DOI: 10.1109/ISATP.2003.1217194

Thomas et al. 2010

Thomas, Ulrike; Wahl, Friedrich, 2010.
Assembly Planning and Task Planning — Two Prerequisites for Automated Robot Programming.
In: Schütz, Daniel; Wahl, Friedrich M. (Hrsg.): *Robotic systems for handling and assembly*.
Berlin: Springer, S. 333–354
ISBN 978-3-642-16784-3
DOI: 10.1007/978-3-642-16785-0_19

Thomas et al. 2015

Thomas, Ulrike; Stouraitis, Theodoros; Roa, Maximo, 2015.
Flexible assembly through integrated assembly sequence planning and grasp planning.
In: *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2015)*, Gothenburg, Sweden,
8/24/2015 - 8/28/2015, S. 586–592
DOI: 10.1109/CoASE.2015.7294142

Thothara 2019

Thothara, Akhilesh, 2019.
Analysis of the CAD exchange format STEP (ISO 10303) to generate assembly features and part relations.
Duisburg-Essen, Universität Duisburg-Essen,
Computational Mechanics, Master Thesis

- Tian et al. 2009** Tian, Ying; Wang, Taiyong; Ding, Baihui; He, G. Y.; Zheng, Huijiang, 2009.
Research on modularization fuzzy petri net of disassembly system.
In: *2009 IEEE 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Beijing, China,
10/21/2009 - 10/23/2009, S. 822–826
DOI: 10.1109/ICIEEM.2009.5344474
- Tian et al. 2019** Tian, Yongting; Zhang, Xiufen; Liu, Zehua; Jiang, Xingyue; Xue, Junfang, 2019. Product cooperative disassembly sequence and task planning based on genetic algorithm.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **105** (5-6), S. 2103–2120
DOI: 10.1007/s00170-019-04241-9
- Tomczak 1992** Tomczak, Torsten, 1992. Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft. Ein Plädoyer für den qualitativen Forschungsansatz.
Marketing ZFP **14** (2), S. 77–87
DOI: 10.15358/0344-1369-1992-2-77
- Trommnau et al. 2020** Trommnau, Jerome; Neb, Alexander; Cordes, Cord; Frommknecht, Andreas; Siegert, Jörg; Wößner, Johannes; Bauernhansl, Thomas, 2020. Limp Component Design for Automatic Assembly – Classification Rating System and Design Rules.
Procedia CIRP **93**, S. 1139–1144
DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.157

-
- Tseng 2006** Tseng, Hwai-En, 2006. Guided genetic algorithms for solving a larger constraint assembly problem.
International Journal of Production Research **44** (3), S. 601–625
DOI: 10.1080/00207540500270513
- Tseng et al. 2008** Tseng, Hwai-En; Chen, Mei-Hwa; Chang, Ching-Chung; Wang, Wen, 2008. Hybrid evolutionary multi-objective algorithms for integrating assembly sequence planning and assembly line balancing.
International Journal of Production Research **46** (21), S. 5951–5977
DOI: 10.1080/00207540701362564
- Ulrich et al. 1976** Ulrich, Peter; Hill, Wilhelm, 1976.
Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre.
Wirtschaftswissenschaftliches Studium : WiSt ; Zeitschrift für Studium und Forschung. - München : Beck, ISSN 0340-1650, ZDB-ID 120285-6 (Vol. 5.1976, 7), S. 304–309
- van Holland et al. 2000** van Holland, Winfried; Bronsvoort, Willem F., 2000.
Assembly features in modeling and planning.
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing **16** (4), S. 277–294
DOI: 10.1016/S0736-5845(00)00014-4
- Venu et al. 2017** Venu, Bitla; Komma, Venkateswara Rao, 2017. STEP-based feature recognition from solid models having non-planar surfaces.
International Journal of Computer Integrated

Manufacturing **30** (10), S. 1011–1028

DOI: 10.1080/0951192X.2016.1268719

Viganò et al. 2012

Viganò, Roberto; Osorio Gómez, Gilberto, 2012. Assembly planning with automated retrieval of assembly sequences from CAD model information.

Assembly Automation **32** (4), S. 347–360

DOI: 10.1108/01445151211262410

Wakita et al. 2000

Wakita, Akira; Yajima, Makoto; Harada, Tsuyoshi; Toriya, Hiroshi; Chiyokura, Hiroaki, 2000. XVI.

In: Brutzman, Don (Hrsg.): *Proceedings of the fifth symposium on Virtual reality modeling language (Web3D-VRML)*, Monterey, California, United States, 2/20/2000 - 2/24/2000, S. 45–51

DOI: 10.1145/330160.330174

Wang et al. 2005

Wang, Junfeng; Liu, J. H.; Zhong, Y. F., 2005. A novel ant colony algorithm for assembly sequence planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **25** (11-12), S. 1137–1143

DOI: 10.1007/s00170-003-1952-z

Wang et al. 2013

Wang, Zhen-Biao; Ng, Lai Xing; Ong, Soh Khim; Nee, Andrew Yeh-Ching, 2013. Assembly planning and evaluation in an augmented reality environment.

International Journal of Production Research **51** (23-24), S. 7388–7404

DOI: 10.1080/00207543.2013.837986

Wang et al. 2013

Wang, Yong; Liu, Jihong, 2013. Subassembly identification for assembly sequence planning.

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **68** (1-4), S. 781–793

DOI: 10.1007/s00170-013-4799-y

Wardhani et al. 2016

Wardhani, Rivai; Xu, Xun, 2016.

Model-based manufacturing based on STEP AP242.

In: *12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, Auckland, New Zealand,

8/29/2016 - 8/31/2016, S. 1–5

DOI: 10.1109/MESA.2016.7587187

Wardhani et al. 2018

Wardhani, Rivai; Liu, Chao; Mubarok, Khamdi; Xu, Xun, 2018.

An Approach to Complete Product Definition Using STEP in Cloud Manufacturing.

In: *Proceedings of the ASME 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference - 2018*, College Station, Texas, USA,

6/18/2018 - 6/22/2018

DOI: 10.1115/MSEC2018-6613

Warnecke et al. 1975

Warnecke, Hans-Jürgen; Löhr, Hans-Günter; Kiener, Waldemar, 1975.

Montagetechnik: Schwerpunkt der Rationalisierung.

Mainz: Krausskopf.

Buchreihe Produktionstechnik heute 7.

ISBN 378300098X

Westkämper et al. 2013

Westkämper, Engelbert; Spath, Dieter; Constantinescu, Carmen; Lentjes, Joachim (Hrsg.), 2013.

Digitale Produktion.

Berlin, Heidelberg: Springer.

ISBN 9783642202599

DOI: 10.1007/978-3-642-20259-9

Wiesbeck 2014

Wiesbeck, Mathey, 2014.

Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung, Zugl.:

München, Technische. Universität, Diss., 2014.

München: Utz.

Forschungsberichte / IWB 285.

ISBN 9783831643691

Xiaoming et al. 2007

Xiaoming, Zhou; Du, Pingan; Yuge, Zhou, 2007.

A Model Based Approach to Assembly Sequence Planning.

In: *2007 International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, China,

8/5/2007 - 8/8/2007, S. 599–606

DOI: 10.1109/ICMA.2007.4303611

Xiong et al. 2015

Xiong, Jing; Hu, Youmin; Wu, Bo; Duan, Xiaokun, 2015. Minimum-cost rapid-growing random trees for segmented assembly path planning.

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **77** (5-8), S. 1043–1055

DOI: 10.1007/s00170-014-6531-y

Zäh et al. 2007

Zäh, Michael; Wiesbeck, Mathey; Wallhoff, Florian;

Stork, Sonja; Engstler, Florian; Bannat, Alexander;

Schubö, Anna; Friesdorf, Frank (Hrsg.), 2007.

Kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage, adaptive Montageführung mittels zustandsbasierter,

umgebungsabhängiger Anweisungsgenerierung: wt Werkstattstechnik online 97, S. 644-650

Zha et al. 1998

Zha, Xuan; Lim, Samuel; Fok, Sai Cheong, 1998. Integrated knowledge-based assembly sequence planning.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **14** (1), S. 50–64
DOI: 10.1007/BF01179417

Zha et al. 2002

Zha, Xuan; Du, Hongwu, 2002. A PDES/STEP-based model and system for concurrent integrated design and assembly planning.
Computer-Aided Design **34** (14), S. 1087–1110

Zhang et al. 2021

Zhang, Heng; Peng, Qingjin; Zhang, Jian; Gu, Peihua, 2021. Planning for automatic product assembly using reinforcement learning.
Computers in Industry **130**, S. 471
DOI: 10.1016/j.compind.2021.103471

Zhao et al. 2018

Zhao, Liping; Li, Bohao; Chen, Hongren; Yao, Yiyong, 2018. An assembly sequence optimization oriented small world networks genetic algorithm and case study.
Assembly Automation **38** (4), S. 387–397
DOI: 10.1108/AA-04-2017-049

Zhao et al. 2019

Zhao, Minghui; Guo, Xian; Zhang, Xuebo; Fang, Yongchun; Ou, Yongsheng, 2019. ASPW-DRL: assembly sequence planning for workpieces via a deep reinforcement learning approach.

Assembly Automation **40** (1), S. 65–75

DOI: 10.1108/AA-11-2018-0211

Zhong et al. 2019

Zhong, Yanru; Jiang, Chaohao; Qin, Yuchu; Yang, Guoyu; Huang, Meifa; Luo, Xiaonan, 2019.

Automatically generating assembly sequences with an ontology-based approach.

Assembly Automation **40** (2), S. 319–334

DOI: 10.1108/AA-12-2018-0271

Zhou et al. 2007

Zhou, Xionghui; Qiu, Yanjie; Hua, Guangru; Wang, Huifeng; Ruan, Xueyu, 2007. A feasible approach to the integration of CAD and CAPP.

Computer-Aided Design **39** (4), S. 324–338

DOI: 10.1016/j.cad.2007.01.005

Zinser 2020

Zinser, Daniel, 2020.

Entwicklung einer Methode zur automatischen Bewertung von Automatisierungspotenzialen eines 3D-Modells.

Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF, Masterarbeit

Zou et al. 2011

Zou, Linghao; Guo, Dongming; Gao, Hang, 2011. A method to analyze the difference of 3-D CAD model files based on feature extraction.

Journal of Mechanical Science and Technology **25** (4), S. 971–976

DOI: 10.1007/s12206-011-0210-9

9 Anhang

9.1 Ergänzende Ansätze zur Bestimmung von Montagesequenzen

9.1.1 Weitere graphenbasierte Ansätze

Ein alternativer Ansatz zur Bestimmung von Montagesequenzen mittels einer graphischen Auswertung sind Petri-Netze. Petri-Netze sind graphische Visualisierungen von diskreten Ereignissystemen, die über Tupel definiert werden (Liu 2009). Abbildung 9.1 veranschaulicht das Petri-Netz der Demontage eines schematischen Kugelschreibers (Guo et al. 2016). Ähnlich wie auch die Knoten der AND/OR-Graphen visualisieren die Plätze bei Petri-Netzen die Montagestände. Die Transitionen hingegen beschreiben die Montage- bzw. Demontageoperationen zwischen den Bauteilen bzw. Unterbaugruppen. Die Optimierungskriterien werden als Kosten der Transitionen beschrieben.

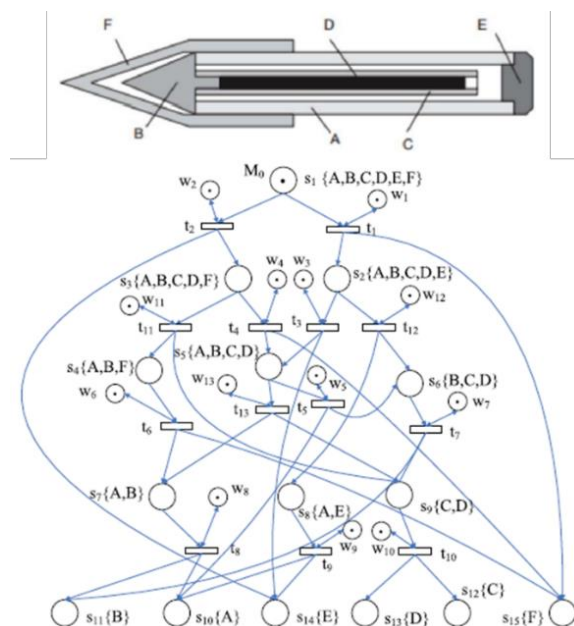


Abbildung 9.1 Demontage-Petri-Netz eines schematischen Kugelschreibers (Guo et al. 2016)

So nutzten Zha et al. (1998) Kontaktkriterien zur manuellen Modellierung eines Montage-Petri-Netzes und den zugehörigen Unterbaugruppen. Zu Beginn muss noch ein Basisbauteil bestimmt werden, welches das erste Bauteil und damit den Ausgangspunkt darstellt. Anschließend werden die einzelnen Montageschritte über die Transitionen abgeleitet. Die Transitionen beinhalten hierbei die Gewichtungen bzw. Kosten der Optimierungskriterien. Die Montagesequenz ergibt sich aus der Verknüpfung der Transitionen mit den geringsten Kosten (Zha et al. 1998).

Bei der Methode von Zha et al. (1998) mussten alle Operationen noch manuell erstellt und ausgeführt werden. Guo et al. (2016) erweiterten diese Methode, indem sie Petri-Netze zur teilautomatischen Bestimmung der Demontage nutzen. Zwar führt diese Methode generell zu einer Demontagesequenz und ein Blick auf die zugehörigen Publikationen verdeutlicht, dass die graphischen Ansätze von Petri-Netzen eher für die Bestimmung von Demontagesequenzen genutzt werden. Allerdings kann diese Auswertungsmethode gleichermaßen dazu genutzt werden, Montagesequenzen zu generieren.

Generell sind Petri-Netze eine beliebte Möglichkeit, um Sequenzen graphisch zu bestimmen. Allerdings konnten auch die Publikationen der letzten Jahre (Hsieh 2007; Tian et al. 2009; Hsu 2017; Lin et al. 2017) keine echten Neuerungen erbringen und auch die Problemstellung der rasant wachsenden Komplexität konnte noch nicht gelöst werden. Allein Abbildung 9.1 veranschaulicht, dass schon kleine Baugruppen mit lediglich sechs Bauteilen und einfachen Beziehungen zu komplexen Graphen führen und damit ähnlichen Herausforderungen wie schon die AND/OR-Graphen gegenüberstehen.

Eine weitere Methode zur graphischen Bestimmung von Montagesequenzen wurde von Galaske (2019) vorgestellt. Ziel dieser Vorgehensweise war es, Zusammenbaubedingungen zu modellieren und auszulesen. Hierzu wurden Assembly Constraints, wie „touch“, „lock“ oder „align“, aus einer STEP-Datei mit der ISO 10303-242 extrahiert. In

jener Arbeit wird das genaue Vorgehen dazu allerdings nicht beschrieben und auch die Grundstruktur wird nur sehr spärlich vorgestellt. Weiterhin ist für eine vollständige Auswertung der Informationen ein manuelles Eingreifen erforderlich, um das Modell noch zusätzlich mit weiteren Informationen anzureichern. Damit reiht sich diese Methode von Galaske (2019) eher in die theoretischen Ansätze und Methoden ein und wird nicht weiter verfolgt.

9.1.2 Ant Colony Algorithm

Ein vielversprechender Ansatz für die Bestimmung von Montagesequenzen aus einem vielfältigen Forschungsbereich mit unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten ist der Ant Colony Algorithm (ACA). Der ACA war ursprünglich dafür angedacht, das Verhalten von Ameisen auf Nahrungssuche zu beschreiben. So stoßen Ameisen Pheromone aus, um anderen Ameisen den Weg zu markieren und damit die Nachverfolgung zur Nahrungsquelle zu ermöglichen. Die Besonderheit ist hierbei, dass auf dem kürzesten Weg die meisten Pheromone ausgestoßen werden (Blum et al. 2004). Abbildung 9.2 visualisiert dieses Verhalten der Ameisen, wenn es zu Hindernissen auf dem Arbeitspfad kommt ($A < B < C < D$). Schon dem Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman fiel dieses Verhalten in seinen frühen Jahren auf. Er erkannte, dass Ameisen immer den kürzeren Weg bevorzugen und sich in der Kolonie organisieren (Feynman et al. 1997; Blum et al. 2004).

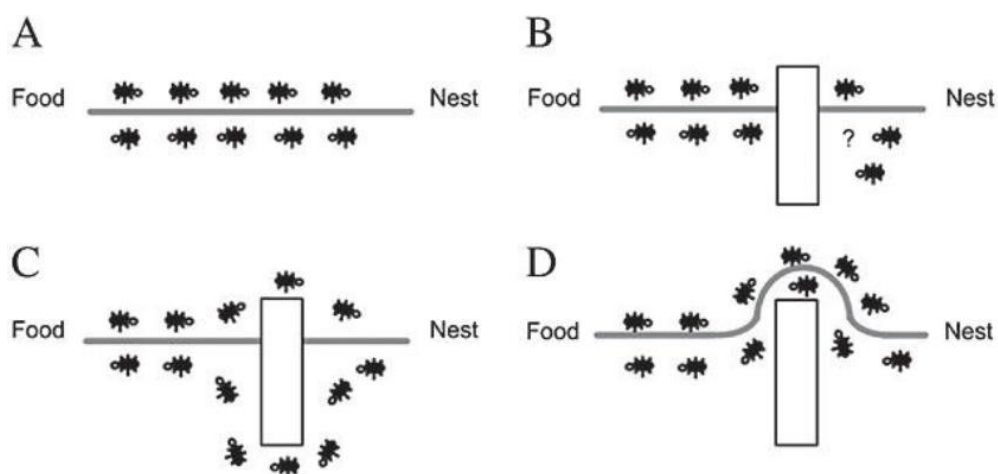


Abbildung 9.2 Das Verhalten von Ameisen bei Hindernissen als Basis für den Ant Colony Algorithm (Blum et al. 2004)

Nach dem erfolgreichen Einsatz in anderen Anwendungsgebieten wandten Wang et al. (2005) den ACA erstmals auch zur Bestimmung von Montagesequenzen an. So werden besuchte Knoten als Montageschritte definiert (Wang et al. 2005). Zu Beginn des Algorithmus wird eine Startposition bestimmt und anschließend wird für jede „Ameise“ ein weiterer Montageschritt gewählt, wobei jedes Bauteil nach der Auswahl für eine Montagesequenz gesperrt wird, um nicht nochmal ausgewählt zu werden. Zu guter Letzt werden alle Montagesequenzen miteinander verglichen, wenn alle „Ameisen“ durchgelaufen sind. Wang et al. (2005) verdeutlichten, wie der ACA für die Bestimmung von Montagesequenzen genutzt werden kann, allerdings wurde nur das Optimierungskriterium der Reorientierung bei dieser Umsetzung betrachtet.

Lu et al. (2008) passten diesen Ansatz schließlich auf die Demontageplanung an und erweiterten diesen um die Optimierungskriterien Minimierung der Werkzeugwechsel und Minimierung der Demontageaufgaben. Die drei Optimierungskriterien werden hierbei über Gewichtungsfaktoren zwischen dem Nest (erstes demontiertes Bauteil) und der Nahrungsquelle (letztes demontiertes Bauteil) definiert. Zwar wurden diese Gewichtungsfaktoren in nachvollziehbaren Funktionen ermittelt, jedoch mussten diese noch manuell erstellt werden.

Eine zusätzliche Erweiterung wurde von Huang et al. (2017) vorgestellt, indem auch noch die Baugruppenstabilität als Optimierungskriterium aufgenommen wurde. Hierzu mussten noch weitere Input-Matrizen in das Zielsystem integriert werden. Allerdings konnte damit nicht das Problem der manuellen Eingabe gelöst werden. Weiterhin hat der ACA zwar vorteilhafte Eigenschaften beim Einsatz der einzelnen „Ameisen“, allerdings ist die Suchrichtung für die Bestimmung der Montagesequenzen sehr starr und folgt oftmals einfach nur der anführenden „Ameise“, was zu einer frühzeitigen und fehlerhaften Konvergenz führen kann (Abdullah et al. 2019). Damit steigt gerade bei größeren Baugruppen die Gefahr der Identifikation schlechterer, wenn nicht sogar fehlerhafter Montagesequenzen.

9.1.3 Particle Swarm Optimization

Ein weiterer Lösungsansatz aus der Naturforschung stellt die Particle Swarm Optimization (PSO) dar. Dieser Ansatz wurde eigentlich von Kennedy et al. (1995) entwickelt, um das Verhalten von Schwärmen, wie in der Tierwelt, zu simulieren. Doch Lv et al. (2010) und Li et al. (2013) nutzten diesen Ansatz für die Optimierung der Montagesequenzgenerierung und ermöglichten so neue Auswertungsmöglichkeiten. Die Besonderheit dieses Ansatzes ist es, dass die möglichen Montagesequenzen als Partikel dargestellt werden und sich damit wie ein Schwarm in einem multidimensionalen Lösungsraum befinden. Die Suche beginnt damit von einer zufälligen Startposition mit einer vorbestimmten Geschwindigkeit. Die Partikel nähern sich über eine Fitnessfunktion dem Optimum an, wobei die Bewegungsrichtung der Partikel von der eigenen Erfahrung und der Erfahrung des gesamten Schwarms beeinflusst wird. Der Vorteil dieses Vorgehens ist die Möglichkeit, den gesamten Lösungsraum untersuchen zu können (Lv et al. 2010).

Als Nachteil dieses Ansatzes muss zum einen die aufwendige Einstellung der Parameter genannt werden und zum anderen die Tatsache, dass der Ansatz für einen kontinuierlichen Lösungsraum entwickelt wurde, doch sich die Bestimmung der Montagesequenzen in einem diskreten Lösungsraum befindet. Aus diesem Grund passten schon Kennedy et al. (1995) den ursprünglichen PSO-Algorithmus so an, dass die Positionen der Partikel auch binär betrachtet werden können (Liang et al. 2010).

Allerdings hatte auch dieser Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) Algorithmus seine Grenzen, da die nun diskreten Variablen nicht direkt optimiert werden konnten. Somit entwickelte Clerc (2004) diesen Ansatz nochmals weiter zu einem Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO) Algorithmus (Clerc 2004; Lv et al. 2010; Ibrahim et al. 2012).

Schließlich nutzten Lv et al. (2010) diesen Ansatz, um Montagesequenzen nach den Optimierungskriterien Minimierung der Orientierungswechsel, Minimierung der

Werkzeugwechsel und Minimierung der Wechsel der Montageaufgaben (Definitionen dazu in Kapitel 2.1.4) vorzunehmen. Eingelesen wurde hierzu eine Interferenzmatrix aus den Montagerichtungen $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$ nach dem Vorbild von Dini et al. (1992). So werden Montagesequenzen, die nicht den Restriktionen der Interferenzmatrix entsprechen oder gegen die Optimierungskriterien wirken, mit Strafen belegt, um die geeignetste Montagesequenz zu identifizieren.

Li et al. (2013) erweiterten diesen Ansatz nochmals um das Optimierungskriterium der Baugruppenstabilität. Dementsprechend mussten noch weitere Matrizen eingelesen werden, um die Analyse zu ermöglichen. Jedoch wurden in jener Arbeit weder die Matrizen extrahiert noch wurde definiert, aus welchen Koeffizienten sich die Fitnessfunktion zusammensetzt.

In der Summe stellten sich die PSO-Ansätze als sehr vielversprechend heraus, jedoch müsste für eine automatisierte Bestimmung der Montagesequenzen erst noch ein Ansatz entwickelt werden, der in der Lage ist, die benötigten Input-Kriterien in Form von Matrizen automatisiert aus einem 3D-Modell zu generieren, da alle bisherigen Arbeiten auf einer manuellen Eingabe der Daten basieren.

9.1.4 Ontologische Ansätze

Weitere, vielversprechende Ansätze zur Bestimmung von Montagesequenzen mit einer potenziellen CAD-Anbindung sind ontologische Ansätze. Mithilfe einer Ontologie können Baugruppen modelliert und durch logische Verknüpfungen in eine relevante Informationsstruktur gebracht werden. So veröffentlichten Dartigues et al. (2007) einen ontologischen Ansatz, der in der Lage ist, Prozessmodelle direkt aus CAD-Systemen zu extrahieren. So wurde ein erstes Konzept einer Ontologie als Brücke zwischen CAD-Systemen und Montageplanungssoftware entwickelt, indem geometrische Features direkt aus CAD-Systemen extrahiert und mit zusätzlichen Restriktionen angereichert werden

(Dartigues et al. 2007). Der Ansatz konnte zwar noch nicht vollständig automatisiert aus den CAD-Systemen generiert werden und die Bestimmung von Montagesequenzen stand hier noch nicht im Fokus, allerdings bot dieser Ansatz die Basis für weitere Untersuchungen.

So entwickelte Hasan (2017) über die Jahre eine Methode, die neben den geometrischen Features auch noch montagerelevante Informationen wie Bauteil- und Montagebeziehungen aus dem CAD-System SolidWorks automatisiert auslesen konnte und als ontologisches Modell speicherte. Weiterhin ist die Ontologie auch dafür ausgelegt, Informationen zu Werkzeugen zu hinterlegen. Somit war die finale Methode von Hasan (2017) in der Lage, große und komplexe Baugruppen darzustellen und als Austauschformat zwischen CAD-Systemen oder Montageplanungssystemen zu nutzen. Jedoch reichen diese Informationen aufgrund fehlender Einbindung von Optimierungskriterien nicht aus, um daraus relevante Montagesequenzen zu bestimmen. Weiterhin ist die bloße Schnittstelle zu potenziellen Montageplanungssystemen keine ausreichende Begründung für eine solche Methode. Zusammengefasst kann gefolgert werden, dass die Methode von Hasan (2017) eine potenzielle Möglichkeit bietet, um eine Schnittstelle zwischen unterschiedlichen CAD-Systemen zu schaffen, jedoch ist diese nicht für die Planung von Montageprozessen geeignet.

Den direkten Bezug zur Bestimmung der Montagesequenz mithilfe eines ontologischen Ansatzes stellten Qiao et al. (2018) und Zhong et al. (2019) vor. Ausgangspunkt war, wie bei Hasan (2017), die ontologische Modellierung geometrischer Informationen, Bauteilpositionen und gefundenen Baugruppenbeziehungen. Der entscheidende Unterschied lag allerdings darin, dass Qiao et al. (2018) die Ontologie so auslegten, dass auch Optimierungskriterien wie die Montageart und Ausführbarkeit der Montage modelliert werden konnten. Zhong et al. (2019) hingegen fokussierten sich auf die Identifikation von Unterbaugruppen. Ausgelesen werden die generierten Modelle schließlich mit einem Reasoning Framework. Abbildung 9.3 veranschaulicht hierbei das

Vorgehen von Qiao et al. (2018) und die Einflüsse des 3D-Modell-Imports und der Montagerregeln.

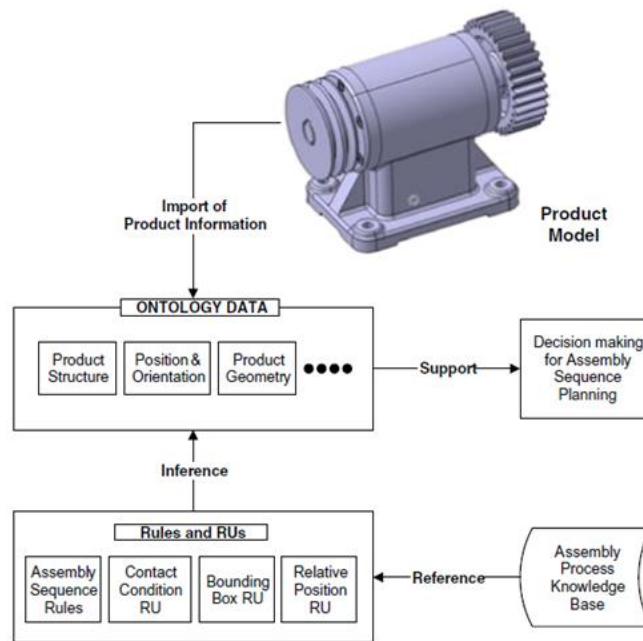


Abbildung 9.3 Aufbau eines ontologischen Ansatzes und Reasoning Framework (Qiao et al. 2018)

Mithilfe von Regeln aus logischen Operationen und den abgeleiteten geometrischen Restriktionen ermittelt schließlich der Reasoner die Montagesequenz (Qiao et al. 2018). Jedoch werden die dahinterliegenden Funktionen nicht näher beschrieben und Zusatzregeln müssen für jeden Anwendungsfall gesondert erstellt werden. Doch genau diese Faktoren spiegeln die offenen Schwachstellen des Ansatzes wider. So bedarf der Ansatz zum einen erweiterter Informationen, die jedoch nicht direkt aus dem CAD-Modell extrahiert werden können und damit als händisch erstellte Matrizen erst in das System eingelesen werden müssen. Zum anderen können die Montagerregeln nur für sehr spezifische Anwendungsfälle genutzt werden. Damit würde jeder nicht betrachtete Anwendungsfall zu einem Sonderfall werden und damit zu fehlerhaften Montagesequenzen führen. Somit wird die geringe Flexibilität von Ontologien dem Ansatz zum Verhängnis und schließt diese für die Bestimmung von Montagesequenzen aus.

9.2 Bestimmung von Features in einer STEP AP203

Zum Auslesen von Features aus einer STEP AP203 nach der ISO 10303-203 sind zahlreiche Schritte und Kombinationen weiterer Features vonnöten. Zur Veranschaulichung des Vorgehens wurden die Ausleseschritte zur Bestimmung einer ebenen Fläche eines Blocks in Abbildung 9.4 grün in einer hierarchischen Struktur hervorgehoben.

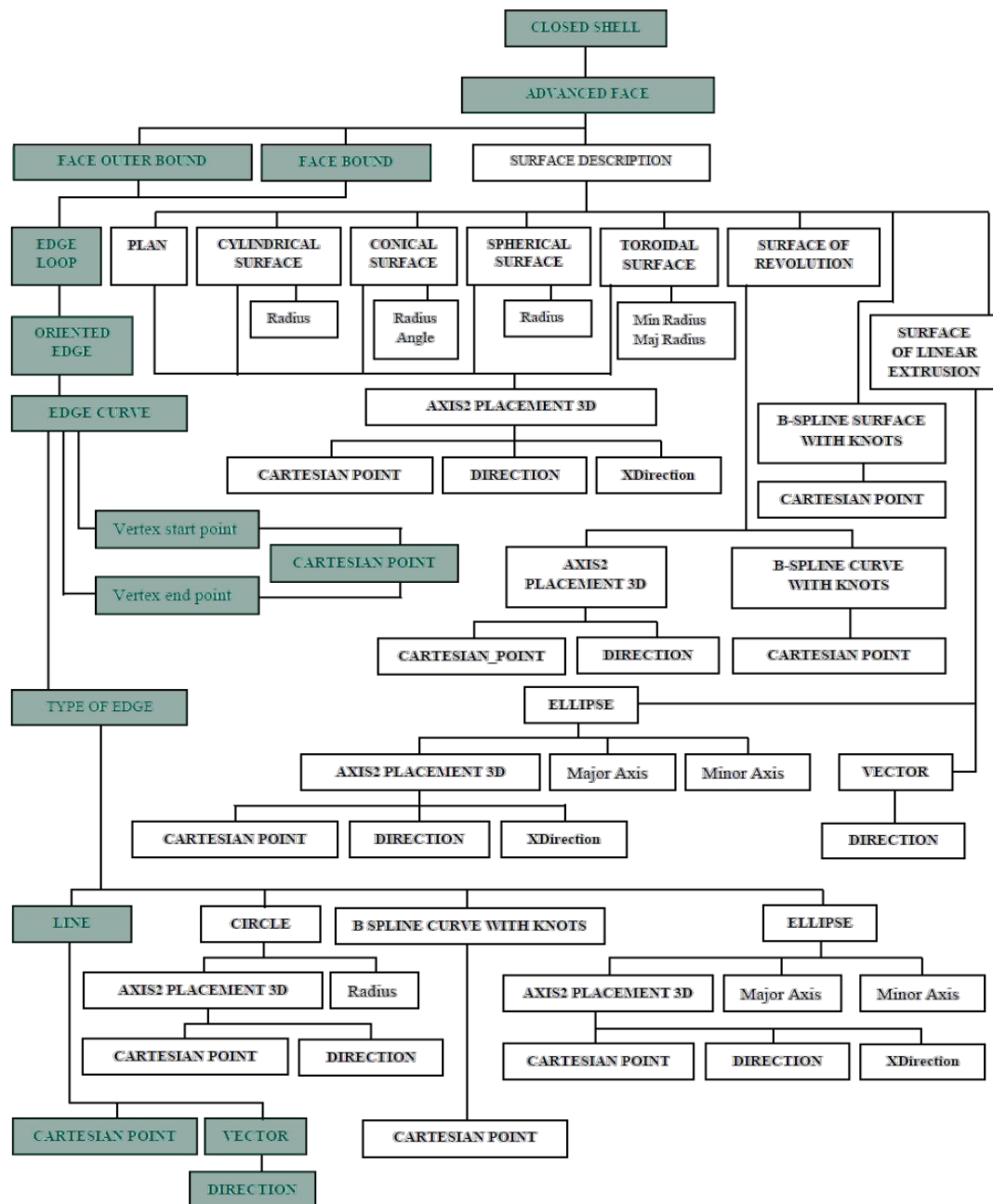


Abbildung 9.4 Struktur einer STEP AP203 in eigener Darstellung in Anlehnung an Oussama et al. (2014)

So muss zur Bestimmung einer solchen „ADVANCED FACE“ zuerst die Außen- und Innenkontur über die „FACE OUTER BOUND“ und „FACE BOUND“ bestimmt werden. Zur Bestimmung dieser braucht es Informationen zu den Kanten, die über „EDGE LOOPS“ und „ORIENTED EDGE“ hergeleitet werden. Diese jedoch müssen wiederum über eine „EDGE CURVE“ bestimmt werden und setzen sich damit aus definierten Start- und Endpunkten in Form von Punkten im Koordinatensystem („CARTESIAN POINT“) und der Art der Kantenform („TYPE OF EDGE“) zusammen. Im Falle eines einfachen Blocks muss daher nach einer „LINE“ gesucht werden, die sich wiederum aus einem Koordinatenpunkt, einem Vektor und einer Vektorrichtung zusammensetzt („CARTESIAN POINT“, „VECTOR“, „DIRECTION“). Durch eine Parser-Funktion können diese Features ausgelesen und systematisiert werden. Damit zeigt sich, dass ein solches Vorgehen generell möglich ist, jedoch auch extrem aufwendig und fehleranfällig ist, besonders bei komplexen Geometrien.

9.3 Implementierung

9.3.1 Extraktion von Bauteileigenschaften

Der Baugruppenname des Gesamtprodukts kann hierbei über einen Abruf im „ModelDoc2“ und anhand einzelner Bauteilnamen über eine Funktion im „PartDoc“ gewonnen werden. Mithilfe dieser Namen können die Bauteile nun von der Baugruppe und den anderen Bauteilen unterschieden werden.

Im Anschluss geht es an die Ermittlung des Volumens. Das Volumen beschreibt den räumlichen Inhalt geometrischer Körper und liefert daher einen Aufschluss über die Größe der Bauteile. Weiterhin wird das Volumen benötigt, um das Gewicht der Bauteile zu bestimmen, wie schon in Formel 3.1 in Kapitel 3.1.1 dargestellt wurde. So müssen in einem ersten Schritt die Bauteileigenschaften über die Funktion „IMassProperty“ aufgerufen werden. Im Anschluss wird über die Funktion „MassProperty::AddBodies“

bestimmt, ob ein Körper aus einem oder mehreren geometrischen Körpern besteht. Allerdings entsprechen mehrteilige Körper in einem getrennten „PartDoc“ bzw. Dokument nicht dem Standard einer ordnungsgemäßen Konstruktion und finden daher in dieser Arbeit keinerlei Beachtung. Zu guter Letzt kann über „MassProperty::Volume“ das Volumen des gewählten Körpers ausgelesen und ausgegeben werden. Gleichermaßen kann an dieser Stelle über „MassProperty::Mass“ das Gewicht des Körpers ausgelesen werden. Das Gewicht der Körper wird von dem CAD-System automatisch bestimmt, wenn das Material bzw. die Dichte hinterlegt ist.

Zur Bestimmung des Materials und der Dichte der Bauteile ist allerdings ein anderer Zugriffspfad zu wählen. So sind Material- und Werkstoffinformationen aus einer internen Datenbank zu entnehmen. Anders als die bisherigen Bauteileigenschaften sind die Materialeigenschaften allerdings in einer textuellen Form hinterlegt und müssen über den Namen identifiziert werden. Über „AssemblyDoc“ kann die Funktion „AssemblyDoc::GetComponents“ ausgeführt werden, um auf jedes Bauteil zugreifen zu können. Mit einem anschließenden Aufruf von „Component2::GetModelDoc2“ kann für jedes Bauteil nochmal auf eine eigene „ModelDoc2“ zugegriffen werden. Aus dieser können sämtliche Konfigurationen der jeweiligen Bauteile ausgelesen werden. Durch das „PartDoc“ kann schließlich mithilfe der Funktion „PartDoc::GetMaterialPropertyName2“ der Name des Materials und dessen Eigenschaften identifiziert werden.

9.3.2 Extraktion von Assembly Features

Zu Beginn müssen die Grundgeometrien und Parameter ausgelesen werden. Mithilfe der Funktionen „ISurface::IsPlane“ (planare Flächen), „ISurface::IsCylinder“ (zylindrische Flächen) und „ISurface::IsCone“ (konische Flächen) kann auf die Geometrien der Bauteile zugegriffen werden. Über „Surface::PlaneParams“ werden Parameter der planaren Flächen, wie Normalvektoren oder Positionen, abgefragt. Zylindrische Parameter, wie Radien oder Achsvektoren, werden über „Surface::CylinderParams“ bzw. „Surface::ConeParams“ aufgerufen. Nachdem alle Parameter und Ausprägungen der

Flächen bekannt sind, werden diese in ihrer Kategorie miteinander verglichen. So werden ausschließlich planare Flächen mit anderen planaren Flächen verglichen oder konische Flächen mit konischen Flächen abgeglichen. Über den Abgleich der Parameter der geometrischen Flächen können zwei Bauteile schließlich in Verbindung gesetzt werden und damit Assembly Features erkannt werden.

9.3.2.1 Planare Kontakte

Zur Identifikation von planaren Kontakten müssen zwei unterschiedliche Bauteile eine gemeinsame Fläche aufweisen. In Bezug auf die planaren Kontakte stellt jedes Bauteilpaar mit einer ebenen Fläche eine potenzielle Beziehung dar. Daher muss in einem weiteren Schritt nach Schnittmengen der planaren Flächen der Bauteile mit der Formel 9.1 gesucht werden. Bei einer positiven Überschneidung muss untersucht werden, ob die Flächen parallel sind und ob diese eine tatsächliche Berührung aufweisen. Hierzu wird zuerst das Kreuzprodukt des Normalvektors gebildet und anschließend der kleinste Abstand zwischen den Bauteilflächen ermittelt. Hierfür wird die Funktion „IModelDoc2::ClosestDistance“ genutzt und es wird untersucht, ob die Flächen aufeinander liegen. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass keine räumliche Trennung zwischen den parallelen Flächen liegt.

$$PFBT1 \cap PFBT2 \neq 0 \quad (9.1)$$

9.3.2.2 Verschraubungen, zylindrische Kontakte und konzentrische Kontakte

Die Identifikation von Kontakten zylindrischer Natur ist deutlich vielschichtiger. So müssen neben zylindrischen Kontakten auch konzentrische Kontakte unterschieden werden. Hierzu muss wiederum zwischen einem Zylinder und einer Bohrung differenziert werden. Ein Zylinder unterscheidet sich von einer Bohrung dahin gehend, dass der Normalvektor eines Zylinders positiv nach außen gerichtet ist und der Normalvektor einer Bohrung

negativ zur Zylinderachse gerichtet ist. Über die Funktionen „Face2::GetUVBounds“ und anschließend „Surface::IEvaluate“ können diese Werte ermittelt werden.

Nachdem die Zylinderart bekannt ist, muss unterschieden werden, ob die zylindrischen Flächen windschief zueinander liegen oder eine reale Kontaktform darstellen. Hierzu werden die Parameter der Zylinder über „ICylinderParams“ aufgerufen und die Vektoren in Achsrichtung werden verglichen. Im Falle einer Kollinearität muss eine Prüfung der Achsposition erfolgen. Dies ist erforderlich, da bisher noch nicht geprüft wurde, ob die zylindrischen Flächen auch tatsächlich gegenseitig und in Nähe liegen. Somit müssen zum einen die Vektoren in Achsrichtung auf der identischen Geraden liegen und zum anderen ineinander in einer zylindrischen Beziehung liegen. Mithilfe der ermittelten Koordinaten aus dem Achsvektor und der zuvor transformierten Koordinatensysteme wird diese Anforderung geprüft. Durch diese zweite Prüfung kann vermieden werden, dass aufeinanderliegende Zylinder unterschiedlicher Bauteile als Assembly Features fehlerhaft identifiziert werden.

In einem letzten Schritt muss die Art des Assembly Features der konzentrischen Beziehungen unterschieden werden. Wenn der Zylinder größer ist als die Bohrung, so muss in einem weiteren Schritt erkannt werden, ob es sich um eine Verschraubung handelt oder ob ein Fehler vorliegt. Wie schon herausgearbeitet wurde, weisen Verschraubungen Überschneidungen der Gewinde auf und führen so zu Darstellungsfehlern. Durch eine Prüfung der Überschneidungen kann geprüft werden, ob die Schnittmenge nach DIN EN 20273 im Rahmen liegt oder ob diese fehlerhafter Natur ist. Wenn die Überschneidung der Norm entspricht, muss geprüft werden, ob tatsächlich Gewinde an den entsprechenden Stellen zu finden sind. Diese sogenannten kosmetischen Gewinde können über den Feature Manager als „CosmeticThread“ identifiziert werden. Durch die Funktion „CosmeticThreadFeatureData::Edge“ können auch die geometrischen Informationen aufgerufen und untereinander verglichen werden. Bei einem positiven Abgleich kann von einer Schraubverbindung ausgegangen werden. Wenn der Radius des Zylinders hingegen identisch mit dem der Bohrung ist, kann eine Presspassung und damit

ein zylindrischer Kontakt erkannt werden. Weiterhin werden mit dieser Vorgehensweise auch alle anderen berührenden konzentrischen Kontakte erkannt.

Der letzte Fall beschreibt den Zustand, wenn der Zylinderradius kleiner ist als der des Bohrungsradius. In diesem Fall kommt es zu keinem physischen Kontakt zwischen den Bauteilen, allerdings dennoch zu einer wichtigen montageplanungsrelevanten Beziehung. Diese sogenannte konzentrische Beziehung als Assembly Feature beschreibt beispielsweise einen Bolzen in einem Durchgangsloch. Auch wenn hier kein tatsächlicher Kontakt stattfindet, kann eine Führung des Bolzens bzw. eine Einschränkung der Freiheitsgrade bei der Montage identifiziert werden. Besonders bei der Betrachtung der Montagestabilität liefert eine konzentrische Beziehung eine wichtige Information.

9.3.2.3 Konische Kontakte

Anders als zylindrische Kontakte fallen die konischen Kontakte aus den bereits angeführten Unterscheidungsmerkmalen heraus. Zur Identifikation eines konischen Kontakts müssen zwar, wie bei den zylindrischen Kontakten, eine Parallelität der Achsen und kein Abstand zwischen den Flächen vorliegen, allerdings mit unterschiedlichen Radien innerhalb der Körper. Durch die Abfrage der Parameter mithilfe von „Surface::ConeParams“ kann der Öffnungswinkel des Konus ermittelt und mit anderen konischen Flächen abgeglichen werden. Bei einer positiven Abgleich kann von einem konischen Kontakt als Assembly Feature ausgegangen werden.

9.3.2.4 Teilzylindrische Kontakte

Zu den teilzylindrischen Kontakten zählen die zylindrischen Kontakte, die mindestens einen nicht vollumschließenden Zylinder oder Konus aufweisen. Diese Kontaktform ist aufgrund ihrer Einschränkungen der Freiheitsgrade in der Kontakttrichtung wichtig. Daher müssen bei dieser Kontaktform zusätzlich der geöffnete Teilzylinder und dessen

Normalvektor identifiziert werden. Hierfür werden die Endpunkte der Öffnung über die Funktionen „GetStartVertex“ und „GetEndVertex“ bestimmt. Diese müssen nicht auf derselben Fläche liegen. Der Normalvektor hingegen liegt auf dem Mittelpunkt der verbindenden Gerade und zeigt von der Kontaktfläche weg.

9.3.2.5 Punkt- und Linienkontakte

Anders als alle bisher genannten Assembly Features können alle Punkt- und Linienkontakte gezielt über Geometrien gesucht werden. Falls damit Berührungspunkte zwischen unterschiedlichen Geometrien zweier Bauteile identifiziert werden, die keinem Assembly Feature zuzuordnen sind, muss eine weitere Prüfung erfolgen. Wenn die Abstände der berührenden Punkte oder Linien gleich null sind, kann von einem tangentialen Punkt- oder Linienkontakt als Assembly Feature ausgegangen werden. Eine Unterscheidung ist hierbei allerdings nicht möglich, da bei einem solchen Kontakt kein Richtungsvektor ausgelesen werden kann.

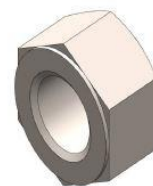
9.4 Automatisch generierte Montageanleitung des MCAB

Modified_Cranfield_Assembly_B enchmark_ABN



Fraunhofer
IPA

Bauteil-Übersicht



Abmessungen

X: 154 mm Y: 185 mm Z: 100 mm

Anzahl Bauteile

14

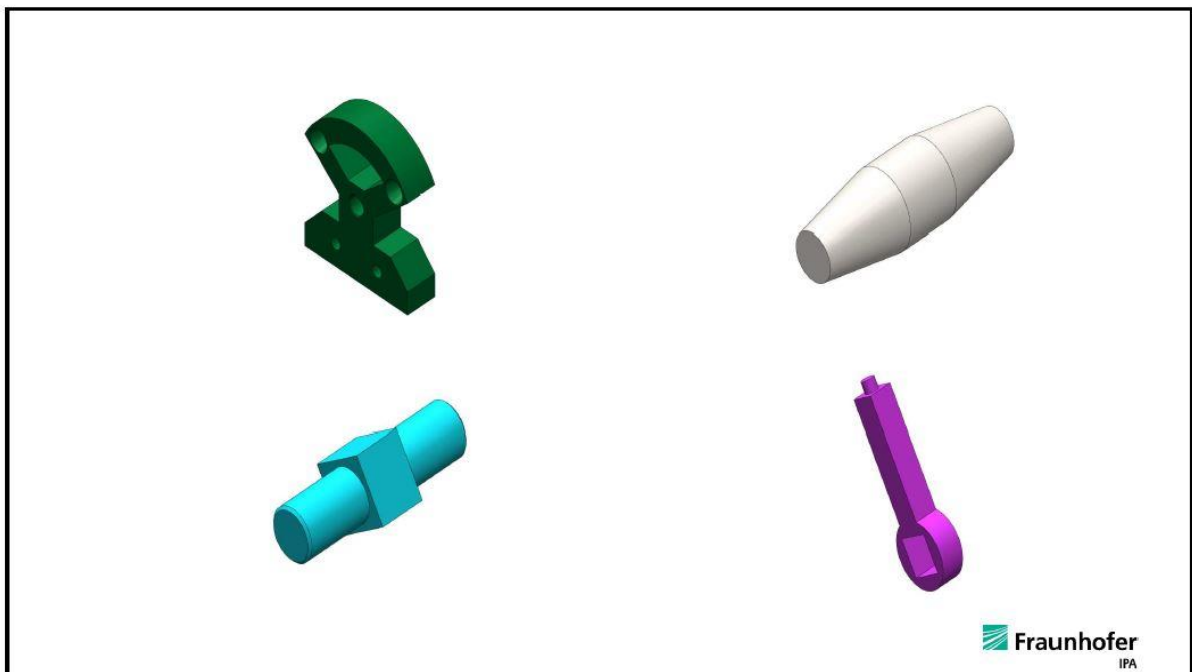
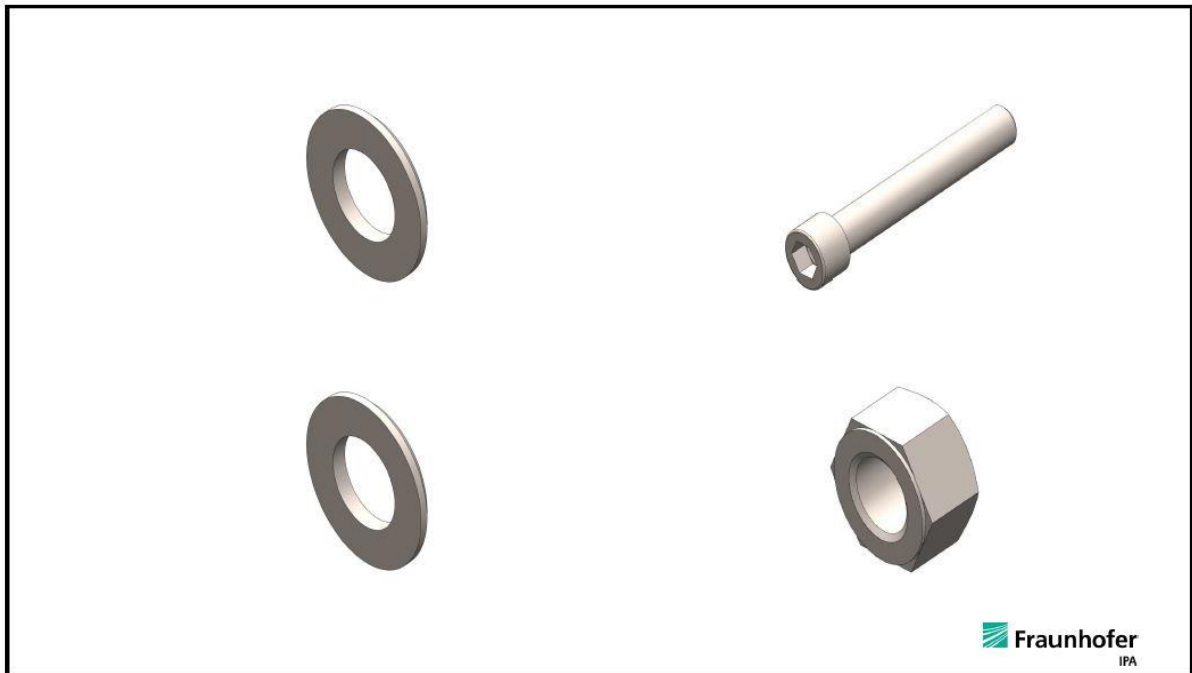
Anzahl Prozessschritte

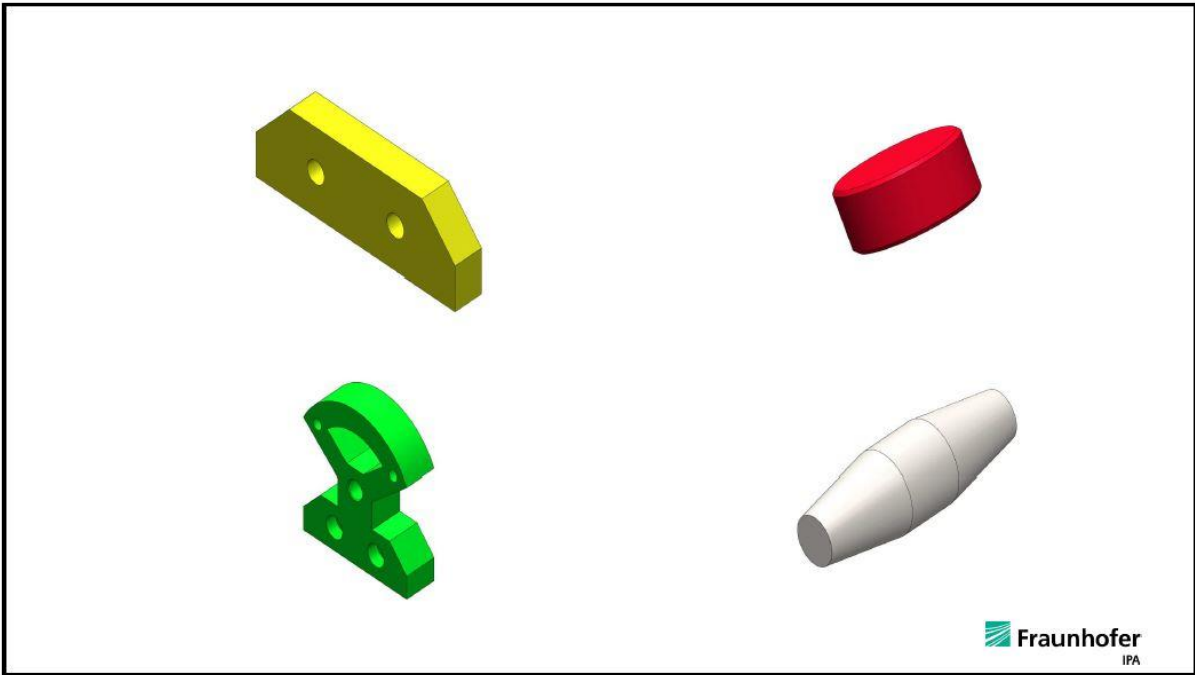
12

Benötigte Werkzeuge

Steckschlüssel SW 18.0

Fraunhofer
IPA





Schritt 1



Bauteilinformationen

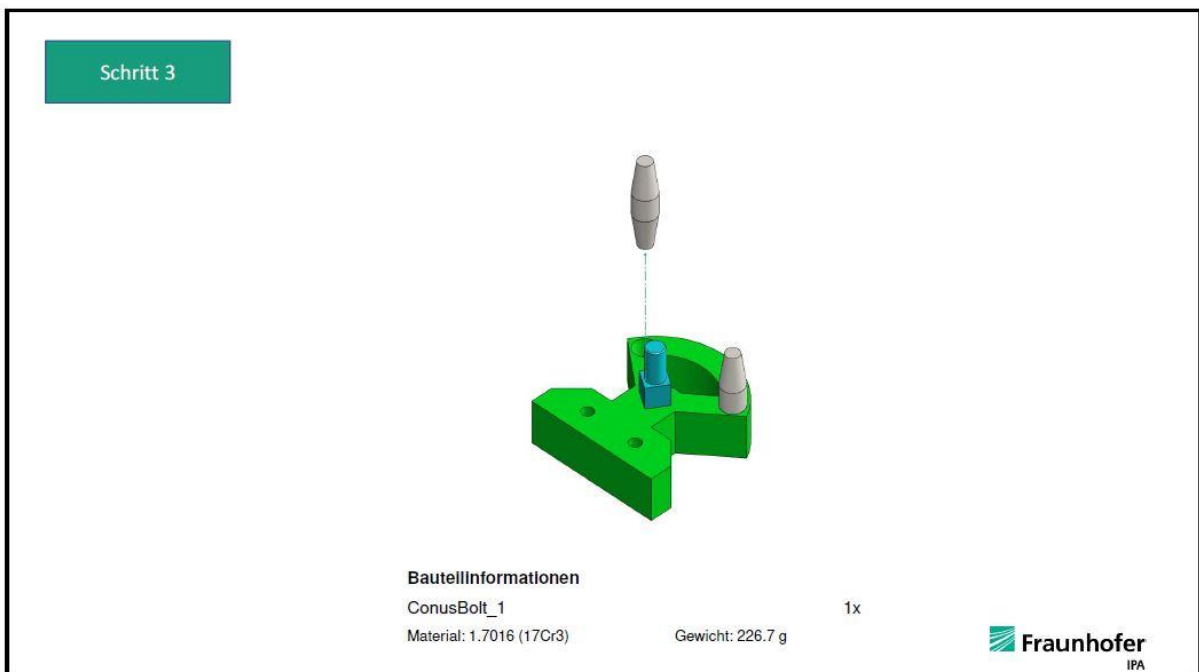
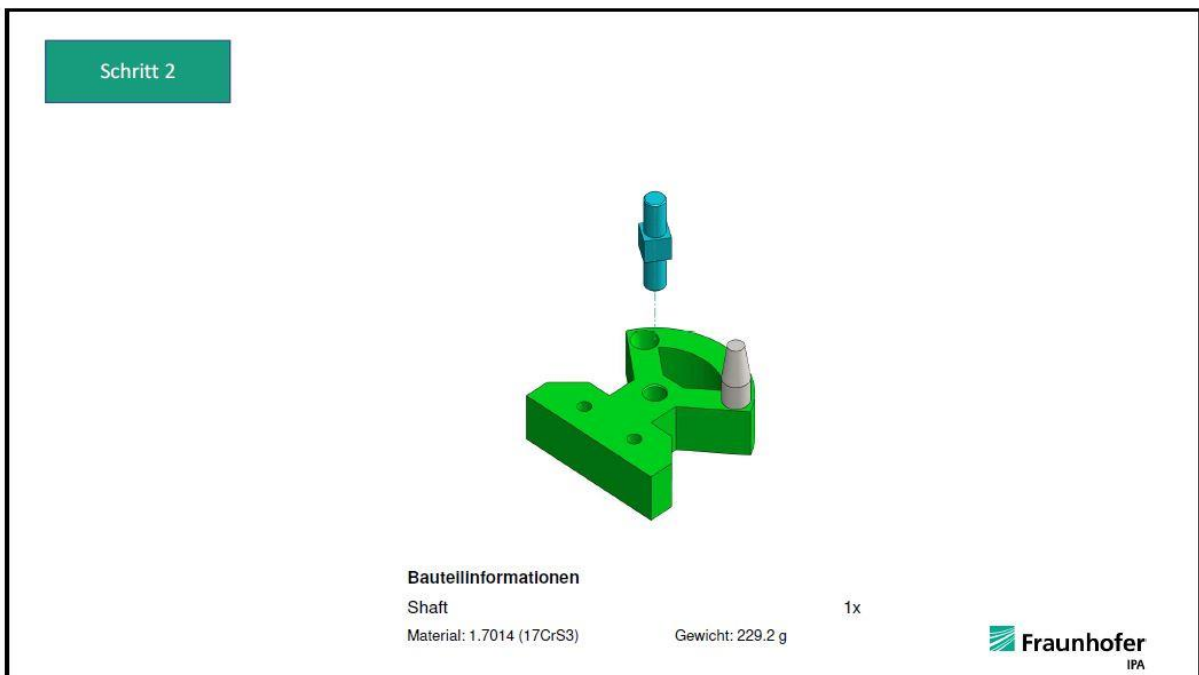
ConusBolt_2

Material: 1.7016 (17Cr3)

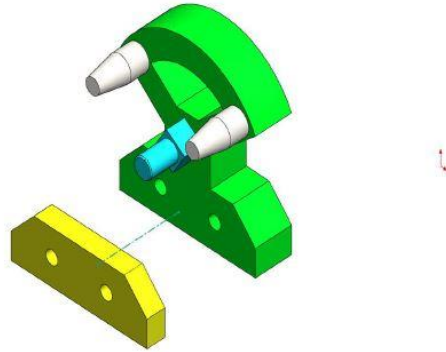
Gewicht: 226.7 g

1x

Fraunhofer
IPA



Schritt 4



Bauteilinformationen

Seperator

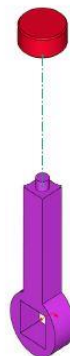
Material: 1.7243 (18CrMo4)

Gewicht: 1031.1 g

1x



Schritt 5



Bauteilinformationen

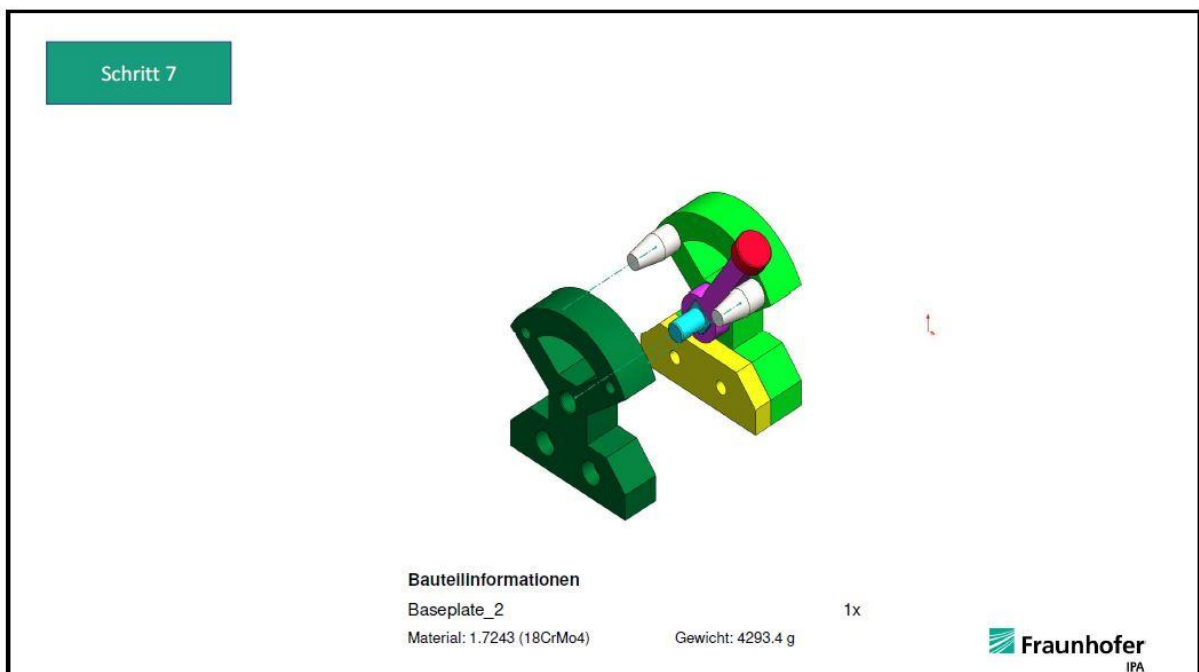
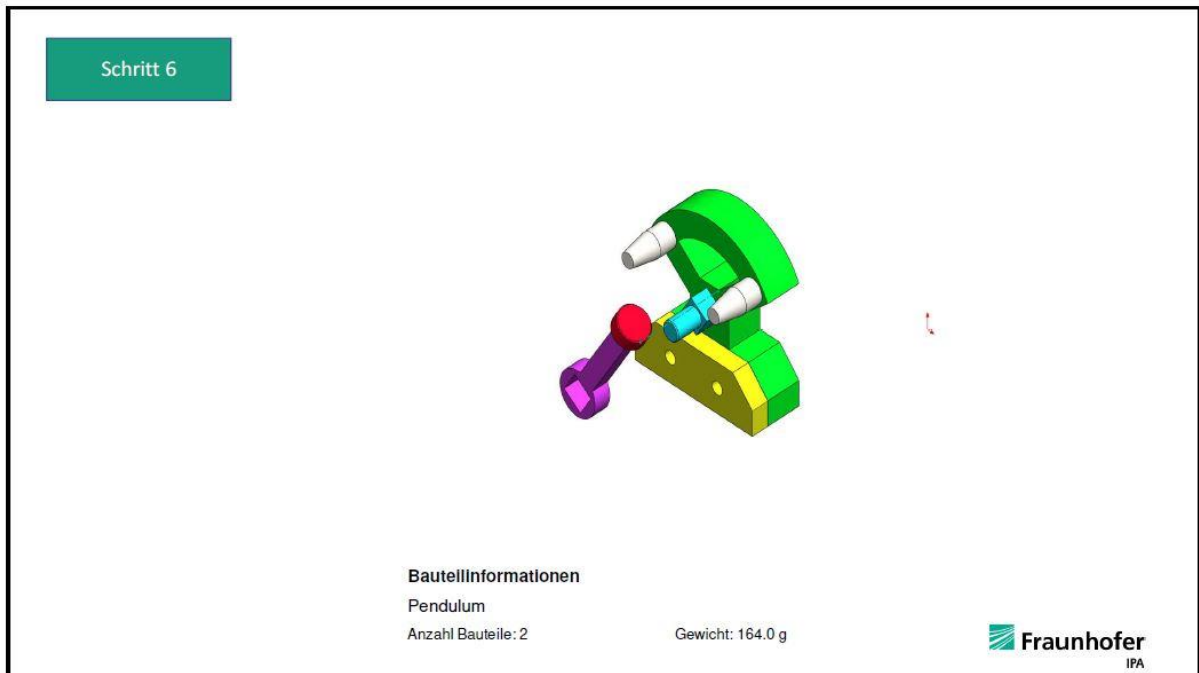
Head

Material: 3.0205 (EN-AW 1200)

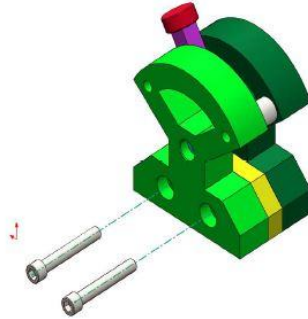
Gewicht: 36.8 g

1x





Schritt 8

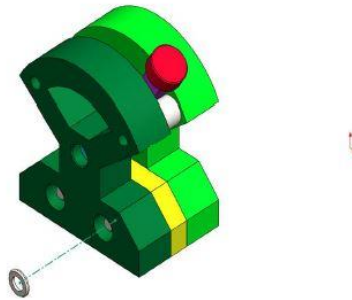


Bauteilinformationen

socket head cap screw_iso-3
Norm: ISO 4762 - M12x80

2x

Schritt 9

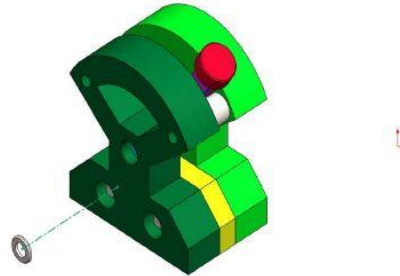


Bauteilinformationen

washer_1_iso-7090 - 12
Norm: ISO 7090 - 12

1x

Schritt 10



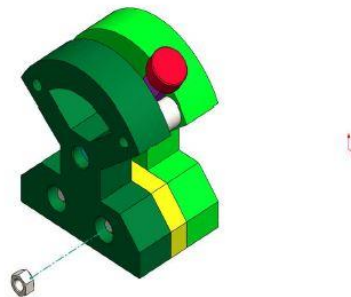
Bauteilinformationen

washer_2_iso-7090 - 12
Norm: ISO 7090 - 12

1x

Schritt 11

Steckschlüssel
SW18.0



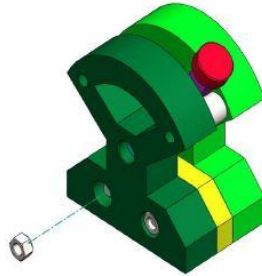
Bauteilinformationen

hex nut_2_iso-4032 - M12
Norm: ISO 4032 - M12x10.8

1x

Schritt 12

Steckschlüssel
SW18.0



Bauteilinformationen

hex nut_2_iso-4032 - M12
Norm: ISO 4032 - M12x10.8

1x

 **Fraunhofer**
IPA

Enjoy your product!



 **Fraunhofer**
IPA

9.5 Bilder des Demonstrators im Future Work Lab



Abbildung 9.5 Gesamtübersicht der beiden Arbeitsplätze (Bild: Fraunhofer IPA)

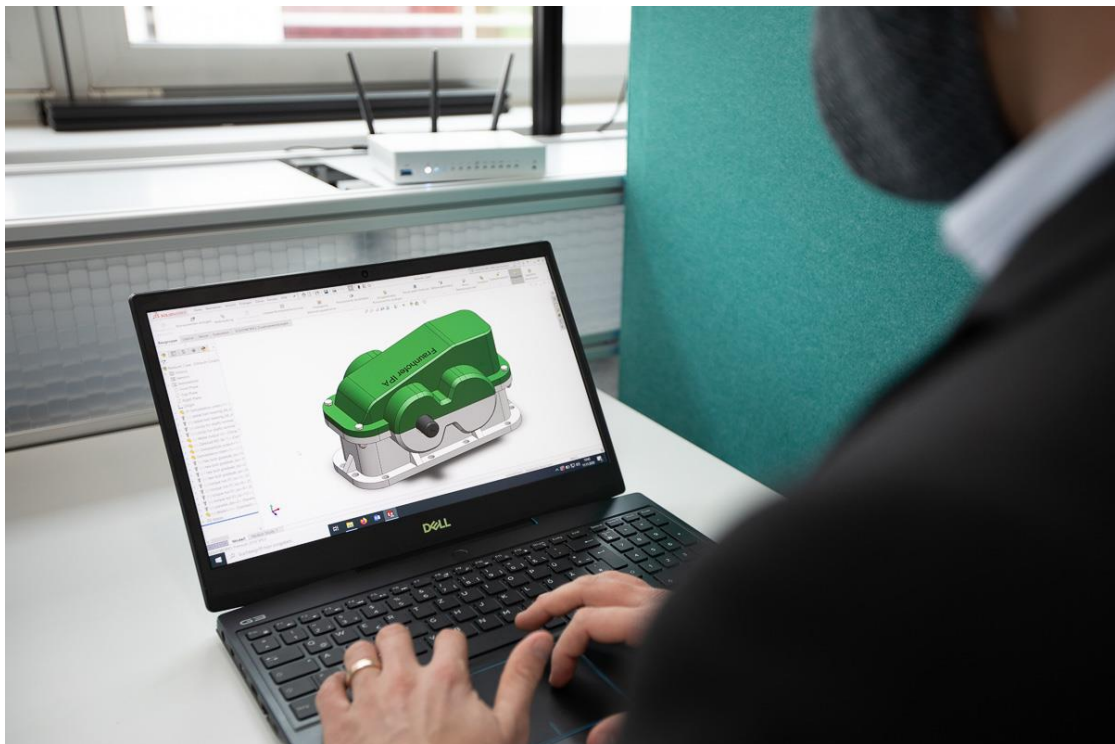


Abbildung 9.6 Arbeitsplatz 1 im Büro: Assistierte Planung der Montage (Bild: Fraunhofer IPA)



Abbildung 9.7 Arbeitsplatz 2 in der Montage: Werker/-in bei der Montage mit der automatisch generierten AR-Montageassistentz (Bild: Fraunhofer IPA)

9.6 Geschwärzter APA-Bogen
















		Automatisierungspotenziale			
Bereich:					
Arbeitsplatz:					
Vorgangsnummer:					
Variante(n):					
Kategorisierung:					
Vereinzeln	Einfluss der Teilebereitstellung		Eignung	Bewertung ("x")	Eignung
	Bereitstellungsart der Füge­teile	1. Bereitstellungsart: ohne Positionierung 2. Bereitstellungsart: ohne Positionierung, aber mit Orientierung 3. Bereitstellungsart: mit Positionierung, aber ohne Orientierung 4. Bereitstellungsart: mit Positionierung und Orientierung 5. Bereitstellungsart: mit Positionierung, Orientierung und Zuführung des Verbindungselements 6. Bereitstellungsart: mit Positionierung, Orientierung und Befestigung des Füge­teils		x	30%
Handhaben	Einfluss des Füge­teils		Eignung	Bewertung ("x")	Eignung
	Steifigkeit	1. Steifigkeit: hoch 2. Steifigkeit: mittel 3. Steifigkeit: niedrig		x	18%
	Greifflächen	1. Greifflächen: vorhanden 2. Greifflächen: vorhanden, aber nicht optimal 3. Greifflächen: vorhanden, aber nicht optimal und nicht stabil		x	27%
	Orientierungsmerkmale	1. Orientierungsmerkmale: vorhanden 2. Orientierungsmerkmale: vorhanden, aber nicht optimal 3. Orientierungsmerkmale: vorhanden, aber nicht optimal und nicht stabil		x	14%
	Oberflächenempfindlichkeit	1. Oberflächenempfindlichkeit: hoch 2. Oberflächenempfindlichkeit: mittel 3. Oberflächenempfindlichkeit: niedrig		x	18%
Positionieren	Einfluss der Füge­stelle		Eignung	Bewertung ("x")	Eignung
	Genauigkeit Zielposition	1. Genauigkeit Zielposition: hoch 2. Genauigkeit Zielposition: mittel 3. Genauigkeit Zielposition: niedrig		x	14%
	Positionierhilfen an den Bauteilen	1. Positionierhilfen an den Bauteilen: vorhanden 2. Positionierhilfen an den Bauteilen: vorhanden, aber nicht optimal 3. Positionierhilfen an den Bauteilen: vorhanden, aber nicht optimal und nicht stabil		x	16%
	Zusätzliche Orientierung durch Rotation	1. Zusätzliche Orientierung durch Rotation: vorhanden 2. Zusätzliche Orientierung durch Rotation: vorhanden, aber nicht optimal 3. Zusätzliche Orientierung durch Rotation: vorhanden, aber nicht optimal und nicht stabil		x	8%
	Zugänglichkeit zur Füge­stelle	1. Zugänglichkeit zur Füge­stelle: hoch 2. Zugänglichkeit zur Füge­stelle: mittel 3. Zugänglichkeit zur Füge­stelle: niedrig		x	22%
	Fügebewegung	1. Fügebewegung: hoch 2. Fügebewegung: mittel 3. Fügebewegung: niedrig		x	5%
	Fügetoleranzen	1. Fügetoleranzen: hoch 2. Fügetoleranzen: mittel 3. Fügetoleranzen: niedrig		x	17%
	Haltestabilität im positionierten Zustand	1. Haltestabilität im positionierten Zustand: hoch 2. Haltestabilität im positionierten Zustand: mittel 3. Haltestabilität im positionierten Zustand: niedrig		x	22%
Fügen	Einfluss des Füge­prozesses		Eignung	Bewertung ("x")	Eignung
	Zuführung des Verbindungselements	1. Zuführung des Verbindungselements: hoch 2. Zuführung des Verbindungselements: mittel 3. Zuführung des Verbindungselements: niedrig		x	36%
	Befestigung des Füge­teils	1. Befestigung des Füge­teils: hoch 2. Befestigung des Füge­teils: mittel 3. Befestigung des Füge­teils: niedrig		x	55%
Automatisierungspotenzial					
			Vereinzeln	30,0%	
			Handhaben	81,4%	
			Positionieren	90,6%	
			Fügen	91,0%	
Fitness für die Automatisierung Gesamt					73,25%

Abbildung 9.8 APA-Bogen (geschwärzt) in Anlehnung an Neb (2020)

