

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Louis Willy Schäfer

**Assistierte, modellbasierte
Grobplanung von Produktionssystemen
mittels Mehrzieloptimierung**

Anwendung am Beispiel hochautomatisierter
Schweißlinien für die Automobilzuliefererindustrie

Band 293

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Louis Willy Schäfer

**Assistierte, modellbasierte Grobplanung von
Produktionssystemen mittels Mehrzieloptimierung**
Anwendung am Beispiel hochautomatisierter
Schweißlinien für die Automobilzuliefererindustrie

Band 293

**Assistierte, modellbasierte Grobplanung von Produktionssystemen
mittels Mehrzieloptimierung**
Anwendung am Beispiel hochautomatisierter Schweißlinien für die
Automobilzuliefererindustrie

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Louis Willy Schäfer, M.Sc.

aus Tübingen

Tag der mündlichen Prüfung: 13.12.2024

Hauptreferentin: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Sebastian Thiede

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2025

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

Print-ISBN 978-3-8440-9799-3
PDF-ISBN 978-3-8440-9893-8
ISSN 2944-6430
eISSN 2944-6449
<https://doi.org/10.2370/9783844098938>

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort der Herausgeber

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als “Wertschöpfungspartner” einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des *Karlsruher Instituts für Technologie* (KIT) im Rahmen des vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung* (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ geförderten Projekts „Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems“ (02J19B099).

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza als Hauptreferentin für ihr Vertrauen und ihre kontinuierliche fachliche und persönliche Unterstützung während der gesamten Zeit. Weiterhin bedanke ich mich sowohl bei Prof. Dr.-Ing. Sebastian Thiede für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats als auch dem Dekan der KIT-Fakultät Maschinenbau Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans für den Prüfungsvorsitz.

Dem *Karlsruhe House of Young Scientists* (KHYS) des KIT danke ich für die Förderung meines Forschungsaufenthaltes am *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) in Boston, USA. Ebenso gilt mein Dank Prof. Jung-Hoon Chun des *Laboratory for Productivity and Manufacturing* für die herzliche Gastfreundschaft und die wissenschaftlichen Diskussionen.

Allen Kolleginnen und Kollegen des wbk, insbesondere im Bereich PRO, danke ich für die fortwährende Unterstützung und den kollegialen Austausch in den vergangenen Jahren. Namentlich seien an dieser Stelle Gwen, Fabian, Lukas, Constantin und Jork erwähnt. Unsere gemeinsamen Projekte und der Institutsalltag bleiben mir fest in Erinnerung. Für das Korrekturlesen dieser Arbeit danke ich Alex und Gwen. Mein besonderer Dank gilt zudem allen Studierenden, die mit großem Engagement zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Speziell hervorheben möchte ich Timon, Stefan, Doreen, Daniel, Luca und Mariella.

Meiner Familie danke ich von Herzen für ihre immerwährende Unterstützung und Rücksichtnahme – ohne euch stünde ich nicht da, wo ich heute stehe. Abschließend gilt mein größter Dank Maj-Britt für die Unterstützung, den Rückhalt und das Verständnis zu jeder Zeit auf dem langen Weg zur Erstellung dieser Arbeit und darüber hinaus.

Karlsruhe, im Dezember 2024

Louis Willy Schäfer

Abstract

Nowadays, automotive manufacturers and suppliers are faced with the challenge of bringing customer individual products to market at the lowest possible price in an ever shorter time due to the increasing number of variants. This requires efficient production system planning. On the other hand, planning in the manufacturing industry today is strongly characterized by manual processes and personal knowledge. This thesis addresses this problem with the aim of developing a holistic approach for assisted, model-based rough planning of production systems.

The approach is divided into four planning steps: The product information available at the time of rough planning is first analyzed. Similarities to product variants that have already been produced are taken into account. The production processes required for product manufacturing and assembly as well as their precedence relationships are then derived. For this purpose, planning rules and personal (implicit) knowledge are formalized as dependencies between product, process and production system in a PPR model. Furthermore, in a third step, the resulting process precedence graph restricts the optimization of the assignment of process steps to stations. In the mathematical modeling of the so-called *Assembly Line Balancing Problem* (ALBP), this work considers complex constraints such as the selection of station equipment, more than one robot per station and a non-discrete assignment of tasks. The solution to the ALBP is then in the fourth step made available to the planner in a digital (simulation) model and thus integrated into a holistic digital planning process.

The approach developed for assisted production system planning is applied to the example of a Tier 1 automotive supplier. Various methods for analyzing the similarity of products are compared and the results discussed. Furthermore, the PPR model of the application example is manually instantiated. Possibilities for data-driven modeling are discussed. Finally, the multi-criteria solution of the ALBP allows an evaluation of the planning result. To this end, a final validation compares the algorithmically generated solution both qualitatively and quantitatively with an example of manual expert planning. This illustrates the general, industrial applicability of the approach. This research work therefore makes a valuable contribution to increasing efficiency in production system planning and thus to reducing costs and time in a sustainable planning process.

Kurzfassung

Automobilhersteller und -zulieferer stehen heutzutage vor der Herausforderung, aufgrund der steigenden Variantenvielfalt in immer kürzerer Zeit kundenindividuelle Produkte zu einem möglichst geringen Preis auf den Markt zu bringen. Das erfordert eine effiziente Produktionssystemplanung. Dem gegenüber steht die in der produzierenden Industrie vorliegende Planung, die stark von manuellen Prozessen und personengebundenem Wissen geprägt ist. Dieser Problemstellung begegnet die vorliegende Arbeit mit dem Ziel der Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes zur assistierten, modellbasierten Grobplanung von Produktionssystemen.

Der Ansatz gliedert sich in vier Planungsschritte: Die zum Zeitpunkt der Grobplanung vorliegenden Produktinformationen werden zunächst analysiert. Hierbei werden Ähnlichkeiten zu bereits produzierten Produktvarianten berücksichtigt. Anschließend werden die zur Herstellung notwendigen Produktionsprozesse und deren Abfolgerestriktionen abgeleitet. Dazu werden Planungsregeln und Erfahrungswissen als Wechselwirkungen zwischen Produkt, Prozess und Produktionssystem in einem PPR-Modell formalisiert. Der resultierende Prozessvorranggraph schränkt schließlich in einem dritten Schritt die betriebsmittelbezogene Optimierung der Zuordnung von Prozessschritten zu Stationen ein. Bei der mathematischen Modellierung des sog. *Assembly Line Balancing Problems* (ALBP) berücksichtigt diese Arbeit komplexe Eigenschaften wie bspw. die Auswahl des Stationsequipments, mehrere Roboter je Station und eine nicht-diskrete Zuordnung der Aufgaben. Die Lösung des ALBP wird dem Planer abschließend in einem digitalen (Simulations-) Modell zur Verfügung gestellt und damit in einen ganzheitlich digitalen Planungsprozess eingebunden.

Der entwickelte Ansatz zur assistierten Produktionssystemplanung wird am Beispiel eines Tier 1 Automobilzulieferers angewandt. Dabei werden verschiedene Methoden zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten verglichen und die Ergebnisse diskutiert. Weiter wird das PPR-Modell des Anwendungsbeispiels manuell instanziiert und anschließend auf Möglichkeiten zur datengetriebenen Modellierung eingegangen. Die multikriterielle Lösung des ALBP erlaubt schließlich eine Bewertung des Planungsergebnisses. Dazu vergleicht eine abschließende Validierung die algorithmisch generierte Lösung sowohl qualitativ als auch quantitativ mit einer beispielhaften, manuellen Expertenplanung. Das verdeutlicht die allgemeine, industrielle Anwendbarkeit des Ansatzes. Damit leistet die vorliegende Forschungsarbeit einen wertvollen Beitrag zur Steigerung der Effizienz in der Produktionssystemplanung und schließlich zur Reduktion von Kosten und Zeit in einem zukunftsfähigen Planungsprozess.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
Symbole	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ausgangssituation und Problemstellung	2
1.3 Zielsetzung	4
1.4 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen	6
2.1 Produktionssystemplanung	6
2.1.1 Einordnung der Produktionssystemplanung in den Planungsprozess .	6
2.1.2 Aufgaben der Produktionssystemplanung	10
2.1.3 Optimierung von Produktionssystemen	12
2.2 Modellierung	19
2.2.1 Das PPR-Modell	19
2.2.2 Model-Based Systems Engineering (MBSE)	22
2.2.3 Datengetriebene Modellierung	24
2.2.4 Modellierung und Simulation	26
2.3 Zwischenfazit und Darlegung des Forschungsgegenstands	28
3 Stand der Forschung	29
3.1 Kriterien zur Bewertung des Stands der Forschung	29
3.2 Vorstellung ausgewählter Ansätze aus der Literatur	35
3.2.1 Ansätze zur assistierten Produktionssystemplanung	35
3.2.2 Ansätze zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten	40
3.2.3 Ansätze zur modellbasierten Verknüpfung von Produkt und Produktion	42
3.2.4 Ansätze zur Optimierung von Produktionssystemen	45
3.2.5 Ansätze zur modularen Visualisierung und Simulation von Produktions-	
systemen	48
3.3 Forschungsdefizit und Forschungsfragen	50
4 Eigener Ansatz	56
4.1 Produktanalyse zur Prozessplanung	58

4.1.1	Vorgehen zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten	59
4.1.2	Auswahl geeigneter Ansätze zur Ähnlichkeitsanalyse	62
4.1.3	Erzeugung synthetischer Trainingsdaten	68
4.2	Systemmodellierung zur Ableitung des Prozessvorranggraphen	70
4.2.1	Ontologie für PPR-Systeme	71
4.2.2	Modellierung von PPR-Systemen	74
4.2.3	Datengetriebene Modellierung zur Reduktion des manuellen Aufwands	84
4.3	Optimierung des Produktionssystems	88
4.3.1	Charakterisierung des Assembly Line Balancing Problems	89
4.3.2	Mathematische Formulierung des Assembly Line Balancing Modells	91
4.3.3	Erklärung des entwickelten Assembly Line Balancing Modells	93
4.4	Visualisierung und Simulation des Produktionssystems	103
5	Anwendung und Ergebnisse	109
5.1	Produktanalyse zur Prozessplanung	109
5.1.1	Manuelle Analyse	111
5.1.2	Analyse geometriebeschreibender Merkmale	111
5.1.3	Autoencoder zur Analyse von Punktwolken	112
5.1.4	Analyse lokaler Deskriptoren	114
5.2	Systemmodellierung zur Ableitung des Prozessvorranggraphen	115
5.2.1	Modellierung des PPR-Systems	116
5.2.2	Modellierung der Wechselwirkungen und Ableitung des Prozessvorranggraphen	117
5.2.3	Datengetriebene Modellierung der Wechselwirkungen	120
5.3	Optimierung des Produktionssystems	123
5.3.1	Initialisierung des Assembly Line Balancing Modells	123
5.3.2	Implementierung des Assembly Line Balancing Modells	124
5.3.3	Evaluation und Interpretation der Ergebnisse	127
5.4	Visualisierung und Simulation des Produktionssystems	136
5.4.1	Modulare 3D-Simulation zur Layoutplanung	136
5.4.2	Modular skalierbare Ablaufsimulation zur Hochlaufplanung	139
5.5	Validierung	140
6	Diskussion und Ausblick	143
6.1	Diskussion	143
6.2	Ausblick	148
7	Zusammenfassung	151

Liste eigener Publikationen	153
Literaturverzeichnis	156
Abbildungsverzeichnis	181
Tabellenverzeichnis	187
Anhang	XVII
A1 Anhang zu Kapitel 3 – Stand der Forschung	XVIII
A2 Anhang zu Kapitel 4.2 – Systemmodellierung	XX
A3 Anhang zu Kapitel 4.3 – Optimierung	XXII
A4 Anhang zu Kapitel 4.4 – Simulation	XXXVI
A5 Anhang zu Kapitel 5 – Anwendungsfall	XXXVII
A6 Anhang zu Kapitel 5.1 – Produktanalyse	XXXIX
A7 Anhang zu Kapitel 5.2 – Systemmodellierung	XLVIII
A8 Anhang zu Kapitel 5.3 – Optimierung	LVI
A9 Anhang zu Kapitel 5.4 – Simulation	LXXV
A10 Anhang zu Kapitel 5.5 – Validierung	LXXXV
A11 Anhang zu Kapitel 6.1 – Diskussion	LXXXVI

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
Allgemein	
alt.	alternativ
bspw.	beispielsweise
d. h.	das heißt
engl.	englisch
i. A.	im Allgemeinen
Max.	Maximal
Min.	Minimal
Mio.	Millionen
sog.	sogenannt
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
Kapitel 1 Einleitung	
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
MoSyS	Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems
OEM	Original Equipment Manufacturer
OICA	Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
TTM	time to market
Kapitel 2 Grundlagen	
ALB	Assembly Line Balancing
ALBP	Assembly Line Balancing Problem
B-Rep	Boundary Representation
CAD	Computer-Aided Design
Cameo	Dassault Systems Cameo Systems Modeler
CONSENS	CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems
CSG	Constructive Solid Geometry
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBOM	Konstruktionsstückliste, engl. <i>Engineering Bill Of Materials</i>
GRAFCET	Graphe de Commande Etape/Transition
INCOSE	International Council on Systems Engineering

Abkürzung	Beschreibung
IP	Ganzzahlige Optimierung, engl. <i>Integer Programming</i>
ISO	International Standards Organization
LP	Lineare Optimierung, engl. <i>Linear Programming</i>
MBOM	Fertigungsstückliste, engl. <i>Manufacturing Bill Of Materials</i>
MBSE	Model-Based Systems Engineering
MILP	Gemischt-Ganzzahlige Lineare Optimierung, engl. <i>Mixed-Integer Linear Programming</i>
MTM	Methods-Time Measurement
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
OMG	Object Management Group
OR	Operations Research
PEP	Produktentstehungsprozess
PPCD	Produkt-Produktions-CoDesign
PPR	Produkt, Prozess, Ressource
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RALB	Robotic Assembly Line Balancing
RALBP	Robotic Assembly Line Balancing Problem
REFA	REFA Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V.
RFLP	Requirements, Functional, Logical, Physical
SALB	Simple Assembly Line Balancing
SALBP	Simple Assembly Line Balancing Problem
SE	Systems Engineering
STEP	STandard for the Exchange of Product model data
STL	Stereolithographie, hier: Standardschnittstelle vieler CAD-Programme
SysML	Systems Modeling Language
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Kapitel 3	Stand der Forschung
AE	Autoencoder
AL	Produktionslinie, engl. <i>Assembly Line</i>
ALB	Assembly Line Balancing
ALBP	Assembly Line Balancing Problem
AML	AutomationML
API	Application Programming Interface

Abkürzung	Beschreibung
AR	Augmented Reality
BMU	Best Matching Unit
CAD	Computer-Aided Design
Cameo	Dassault Systems Cameo Systems Modeler
CONSENS	CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems
EBOM	Konstruktionsstückliste, engl. <i>Engineering Bill Of Materials</i>
EDM	Engineering Data Management
FF	Forschungsfrage
GRAFCET	Graphe de Commande Etape/Transition
INCOSE	International Council on Systems Engineering
JSS	Job Shop Scheduling
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LMRT	Local Matching Region Tree
MASON	MANufacturing's Semantics ONtology
MBOM	Fertigungsstückliste, engl. <i>Manufacturing Bill Of Materials</i>
MBSE	Model-Based Systems Engineering
MCAS	minimum constraint assembly state
MILP	Gemischt-Ganzzahlige Lineare Optimierung, engl. <i>Mixed-Integer Linear Programming</i>
ML	Maschinelles Lernen
MPA	Modular Plant Architecture
OMG	Object Management Group
OOSEM	Object-Oriented Systems Engineering Method
PEP	Produktentstehungsprozess
PF	Produktionsfolge
PLC	Programmable Logic Controller
PPR	Produkt, Prozess, Ressource
ProSyCo	Ontology for Production System Concept
PV	Prozessvorranggraph
QUICCI	Quick Intersection Count Change Image
RALB	Robotic Assembly Line Balancing
RALBP	Robotic Assembly Line Balancing Problem
RNN	Rekurrentes Neuronales Netz, engl. <i>Recurrent Neural Network</i>
SHREC	SHape REtrieval Contest
SOM	self-organizing map

Abkürzung	Beschreibung
SysML	Systems Modeling Language
UML	Unified Modeling Language
Kapitel 4	Eigener Ansatz
ALB	Assembly Line Balancing
ALBP	Assembly Line Balancing Problem
BDD	Block Definition Diagram
BWS	Basiswertstrom
CAD	Computer-Aided Design
Cameo	Dassault Systems Cameo Systems Modeler
CONSENS	CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems
CRISP-DM	Cross Industry Standard Process for Data Mining
csv	comma-separated values
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSM	Design Structure Matrix
FF	Forschungsfrage
GFV	Latenter Vektor, engl. <i>Global Feature Vector</i>
GRAFCET	Graphe de Commande Etape/Transition
ISO	International Standards Organization
KNN	k-Nearest Neighbor
KPI	Key Performance Indicator
MAPE	Mean Average Percentage Error
MASON	MANufacturing's Semantics ONtology
MBSE	Model-Based Systems Engineering
ML	Maschinelles Lernen
MLP	Multi-Layer Perzeptron
MTM	Methods-Time Measurement
MoSyS	Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems
NN	Nächster Nachbar, engl. <i>nearest neighbor</i>
OC	Orbit Cell
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OP	Operation
PPR	Produkt, Prozess, Ressource
ProSyCo	Ontology for Production System Concept
QUICCI	Quick Intersection Count Change Image

Abkürzung	Beschreibung
RALBP	Robotic Assembly Line Balancing Problem
REFA	REFA Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V.
RFLP	Requirements, Functional, Logical, Physical
RMSE	Root Mean Squared Error
SALBP	Simple Assembly Line Balancing Problem
STEP	STandard for the Exchange of Product model data
STL	Stereolithographie, hier: Standardschnittstelle vieler CAD-Programme
SysML	Systems Modeling Language
TC	Turntable Cell
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Kapitel 5	Anwendung und Ergebnisse
AL	Assembly Line
ALB	Assembly Line Balancing
ALBP	Assembly Line Balancing Problem
API	Application Programming Interface
BWS	Basiswertstrom
CAD	Computer-Aided Design
Cameo	Dassault Systems Cameo Systems Modeler
CONSENS	CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems
Constr.	Constraint
csv	comma-separated values
DEAP	Distributed Evolutionary Algorithms in Python
DIN	Deutsches Institut für Normung
EOL	End-Of-Line
GRAFCET	Graphe de Commande Etape/Transition
ISO	International Standards Organization
KNIME	KoNstanz Information MinEr
kNN	k-Nearest Neighbor
Laserschn.	Laserschneiden
MAG	Metallschweißen mit aktiven Gasen
MAPE	Mean Average Percentage Error
MTM	Methods-Time Measurement

Abkürzung	Beschreibung
multikrit.	multikriteriell
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
OC	Orbit Cell
OEM	Original Equipment Manufacturer
OP	Operation
PCA	Hauptkomponentenanalyse, engl. <i>Principal Component Analysis</i>
PPR	Produkt, Prozess, Ressource
QUICCI	Quick Intersection Count Change Image
RMSE	Root Mean Squared Error
RTB	Verbundlenkerachse, engl. <i>Rear Twist Beam</i>
r/l	rechts/links
SysML	Systems Modeling Language
TC	Turntable Cell
t-SNE	t-Stochastic Neighborhood Embedding
Var.	Variable
V2A	Versuchsschmelze 2 Austenit
ZE	Zeiteinheit
Kapitel 6	Diskussion und Ausblick
ALB	Assembly Line Balancing
BWS	Basiswertstrom
CAD	Computer-Aided Design
FF	Forschungsfrage
LCA	Life Cycle Assessment
MoSyS	Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems
PPCD	Produkt-Produktions-CoDesign
PPR	Produkt, Prozess, Ressource
QUICCI	Quick Intersection Count Change Image
RL	Reinforcement Learning
SysML	Systems Modeling Language
Kapitel 7	Zusammenfassung
ALB	Assembly Line Balancing
PPR	Produkt, Prozess, Ressource

Symbole

Symbol	Beschreibung
Kapitel 2	Grundlagen
Branch-&-Bound	
P_0	Ausgangsproblem
P'_0	LP-Relaxiertes Problem
P_1, P_2	Subprobleme
Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II	
N	Größe der Anfangspopulation
P_t	Anfangspopulation
Q_t	Neue Population
R_t	Aus P_t und Q_t kombinierte Population
Multikriterielle Optimierung	
$F_i(x)$	Funktionswert des Ziels i
λ_i	Gewichtungsvektor des Ziels i
z_i^*	Optimalwert bei einkriterieller Optimierung nach dem Ziel i
Z_i	Zielerreichungsgrad eines Ziels i
Zuordnungsproblem	
c_{ij}	Kosten der Aufgabe i auf Station j
m	Anzahl der Stationen j
n	Anzahl der Aufgaben i
x_{ij}	Binäre Entscheidungsvariable der Zuordnung von Aufgabe i zu Station j
Kapitel 3	Stand der Forschung
α	Eigenschaften des Vorranggraphen
α_1	produktspezifischer Vorranggraph
α_2	Struktur des Vorranggraphen
α_3	Eigenschaften der Bearbeitungszeiten
α_4	sequenzabhängige Bearbeitungszeiten
α_5	Restriktionen bei Aufgaben-Zuordnung
α_6	Prozessalternativen
β	Eigenschaften von Stationen & Fließband
β_1	Transport der Produkte
β_2	Layout der Assembly Line
β_3	Parallelisierung
β_4	Zuordnung von Equipment

Symbol	Beschreibung
β_5	stationsabhängige Bearbeitungszeiten
β_6	weitere Konfigurationsmöglichkeiten
γ	Zielfunktion
$type$	Aufgaben-Zuordnung durch Stationstyp beeinflusst
$pwork^2$	Anzahl Arbeitsroboter = 2
res°	Stationstypen durch Zuordnung von Equipment
Δt_{unp}	Berücksichtigung unproduktiver Zeiten
$mult$	Multikriterielle Optimierung

Kapitel 4	Eigener Ansatz
-----------	----------------

Geometriebeschreibende Merkmale

V	Volumen
S	Umhüllende Fläche
m	Masse
ρ	Dichte

Datengetriebene Modellierung

R^2	Bestimmtheitsmaß
-------	------------------

Charakterisierung des Assembly Line Balancing Problems

α_5	Restriktionen bei Aufgaben-Zuordnung
β_3	Parallelisierung
β_4	Zuordnung von Equipment ($pwork^2$ bedeutet max. 2 Roboter)
β_5	Stationsabhängige Bearbeitungszeiten
γ	Zielfunktion

Assembly Line Balancing Modell

$a_{addRobot}$	Zusätzlicher Flächenbedarf eines Bearbeitungsroboters
a_{addTC}	Zusätzlicher Flächenbedarf einer Turntable Cell
a_{base}	Basisflächenbedarf einer Station
a_{handIH}	Zusätzlicher Flächenbedarf bei manueller Handhabung
a_{handIR}	Zusätzlicher Flächenbedarf eines Handhabungsroboters
α_j	Gibt an, ob an Station j zwei Roboter hat oder nicht
β_j^H	Gibt an, ob Station j manuell beladen wird
β_j^R	Gibt an, ob an Station j durch einen Roboter beladen wird
$c_{addRobot}$	Zusatzkosten eines Bearbeitungsroboters
c_{addTC}	Zusatzkosten einer Turntable Cell
c_{base}	Basiskosten einer Station
c_{handIH}	Zusatzkosten bei manueller Handhabung

Symbol	Beschreibung
c_{handlR}	Zusatzkosten eines Handhabungsroboters
c_t	Maximal zulässige Taktzeit (Kundentakt)
γ_j^H	Gibt an, ob an Station j der Transfer zur nächsten Station von einem Menschen übernommen wird oder nicht
γ_j^R	Gibt an, ob an Station j der Transfer zur nächsten Station von einem Roboter übernommen wird oder nicht
δ_j	Gibt an, ob an Station j ein Drehtisch (TC) zur Verfügung steht oder nicht
f_{ij}	Gibt an, ob Aufgabe i auf Station j fertiggestellt wird oder nicht
F_{ik}	Matrix die angibt, ob Aufgabe i auf Stationstyp k bearbeitet werden muss
G_a	Zielfunktion Minimierung des Flächenbedarfs
G_a^*	Optimalwert bei einkriterieller Minimierung des Flächenbedarfs
G_c	Zielfunktion Kostenminimierung
G_c^*	Optimalwert bei einkriterieller Kostenminimierung
G_d	Zielfunktion Minimierung der Toleranzabweichungen
G_d^*	Optimalwert bei einkriterieller Minimierung der Toleranzabweichungen
G_f	Zielfunktion Maximierung der Taktzeitreserve
G_f^*	Optimalwert bei einkriterieller Maximierung der Taktzeitreserve
G_m	Multikriterielle Zielfunktion
I	Menge aller Aufgaben i
I^{crit}	Menge toleranzkritischer Aufgaben
J	Menge aller potentiell zu eröffnenden Stationen j
K	Menge der Stationstypen k (Schweißen $k = 1$, Laserschneiden $k = 2$, Prüfen $k = 3$)
l_{pj}	Gibt an, ob Bauteil p auf Station j zu beladen ist
$L_{ip_1p_2}$	Matrix, die angibt, ob Aufgabe i eine Verbindung zwischen den Teilen 1 und 2 herstellt oder nicht
λ_a	Gewichtungsfaktor Zielkriterium Flächenbedarf
λ_c	Gewichtungsfaktor Zielkriterium Kosten
λ_d	Gewichtungsfaktor Zielkriterium Toleranzabweichungen
λ_f	Gewichtungsfaktor Zielkriterium Taktzeitreserve
m_{limit}	Maximale für die manuelle Handhabung zulässige Gesamtmasse
m_p	Masse des Teils p
m_j^{product}	Gibt das Gesamtgewicht des Zwischenprodukts am Ende von Station j an
M	Hinreichend große Zahl (Teil der sog. Big-M-Formulierung)
s	Gibt die Anzahl eröffneter Stationen an

Symbol	Beschreibung
N_{ip}	Matrix, die für alle Aufgaben i angibt, welche Bauteile p zu deren Bearbeitung benötigt werden
o_{ij}	Gibt an, ob für Aufgabe i auf Station j eine Überlappung vorliegt
p_i	Anzahl neu zu beladender Teile für Aufgabe i
P	Menge aller Bauteile p
P_{mn}	Vorrangmatrix, die die Abfolgerestriktionen zwischen den Aufgaben enthält
t_i	Benötigte Gesamtbearbeitungszeit für Aufgabe i
t_{in, R_p}	Beladezeit für Teil p bei Handhabung mit einem Roboter
t_{in, H_p}	Beladezeit für Teil p bei Handhabung mit einem Menschen
t^0	Zeit (Strafterm), die für eine Überlappung benötigt wird
$t^{out, R}$	Transferzeit bei Entnahme des Zwischenprodukts durch einen Roboter
$t^{out, H}$	Transferzeit bei Entnahme des Zwischenprodukts durch einen Menschen
t^{pos}	Positionierzeit eines Roboters
t^{res}	Gibt die zur Verfügung stehende Taktzeitreserve über alle Stationen an
t^{turn}	Drehzeit des Drehtischs (TC)
v_{jk}	Gibt an, ob Station j vom Typ k eröffnet wird oder nicht
w_{ijk}	Gibt an, ob Aufgabe i auf Station j vom Typ k bearbeitet wird
x_{ijk}	Gibt an, welcher Anteil von Aufgabe i auf Station j vom Typ k bearbeitet wird
x_i^{\min}	Kleinstmöglicher Bearbeitungsanteil einer Aufgabe i auf einer einzelnen Station
y_{ij}	Gibt an, ob die Bearbeitung von Aufgabe i an Station j bereits begonnen wurde
z_{ij}	Gibt an, ob die Bearbeitung von Aufgabe i an Station j bereits abgeschlossen ist

Erweiterungsmodell I

a_{in}	Gibt die Anzahl beladener Teile an
a_{out}	Gibt die Anzahl entladener Teile an
c_0, c_n	Farben des <i>coloring</i> -Algorithmus
$c_{p_1 p_2 j}$	Gibt die Anzahl an bereits realisierten Verbindungen zwischen Teil 1 und Teil 2 auf Station j an
$cb_{p_1 p_2 j}$	Gibt an, ob mindestens eine Verbindung zwischen Teil 1 und Teil 2 auf Station j besteht oder nicht
$ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j}$	Gibt an, ob Teil 1, Teil 2, Farbe c_o und Farbe c_n auf Station j eine sog. <i>color changing part combination</i> darstellen oder nicht
$change_{c_o c_n j}$	Gibt an, ob auf Station j ein Farbwechsel von c_o zu c_n stattfindet oder nicht

Symbol	Beschreibung
$col_{p_1j c}$	Gibt an, ob Teil 1 auf Station j Farbe c besitzt oder nicht
$cpc_{pj c_o c_n}$	Gibt an, ob auf Station j für Teil p ein Farbwechsel von c_o zu c_n stattfindet oder nicht
ec_{cj}	Gibt an, ob mindestens ein beladenes Teil auf Station j Farbe c besitzt oder nicht
$lpc_{pj c}$	Gibt an, ob Teil p mit Farbe c auf Station j bereits beladen wurde oder nicht
$L_{ip_1 p_2}$	Matrix, die angibt, dass zwei Teile p_1 und p_2 mit Aufgabe i verbunden sind
s_j	Gibt die Anzahl verschiedener Farben auf Station j an

Kapitel 5 Anwendung und Ergebnisse

Analyse geometriebeschreibender Merkmale

m	Masse des Bauteils
ρ	Dichte des Bauteils
S	Umhüllende Fläche des Bauteils
V	Volumen des Bauteils
x, y, z	Abmessungen (x, y, z) des Bauteils

Autoencoder zur Analyse von Punktwolken

M	Dimension des latenten Vektors
N	Anzahl der Punkte einer Punktwolke

Datengetriebene Planzeitbestimmung

c_t	Maximal zulässige Taktzeit (Kudentakt)
M	Durchschnitt
MTM_{Faktor}	Zuschlagsfaktor
n	Anzahl Bauteile
N	Anzahl de Beobachtungen
R^2	Modellgüte / Bestimmtheitsmaß
t_{ges}	Gesamte Planzeit
t_{Grund}	Grundzeit
$t_{\text{Handhabung}}$	Handhabungszeit
$t_{\text{Rüsten}}$	Rüstzeit
t_{Umsetzen}	Umsetzzeit

Assembly Line Balancing

α_5	Restriktionen bei Aufgaben-Zuordnung
α_j	Gibt an, ob an Station j zwei Roboter hat oder nicht
β_j^H	Gibt an, ob Station j manuell beladen wird
β_j^R	Gibt an, ob an Station j durch einen Roboter beladen wird

Symbol	Beschreibung
β_3	Parallelisierung
β_4	Zuordnung von Equipment
β_5	Stationsabhängige Bearbeitungszeiten
c_0, c_n	Farben des <i>coloring</i> -Algorithmus
γ	Zielfunktion
γ_j^H	Gibt an, ob an Station j der Transfer zur nächsten Station von einem Menschen übernommen wird oder nicht
γ_j^R	Gibt an, ob an Station j der Transfer zur nächsten Station von einem Roboter übernommen wird oder nicht
δ_j	Gibt an, ob an Station j ein Drehtisch (TC) zur Verfügung steht oder nicht
F_{ik}	Matrix die angibt, ob Aufgabe i auf Stationstyp k bearbeitet werden muss
G_a	Zielfunktion Minimierung des Flächenbedarfs
G_c	Zielfunktion Kostenminimierung
G_d	Zielfunktion Minimierung der Toleranzabweichungen
G_f	Zielfunktion Maximierung der Taktzeitreserve
I	Menge aller Aufgaben i
J	Menge aller potentiell zu eröffnenden Stationen j
K	Menge der verschiedenen Stationstypen k
λ_a	Gewichtungsfaktor Zielkriterium Flächenbedarf
λ_c	Gewichtungsfaktor Zielkriterium Kosten
λ_d	Gewichtungsfaktor Zielkriterium Toleranzabweichungen
λ_f	Gewichtungsfaktor Zielkriterium Taktzeitreserve
P_{mn}	Vorrangmatrix, die die Abfolgerestriktionen zwischen den Aufgaben enthält
t_i	Benötigte Gesamtbearbeitungszeit für Aufgabe i
x_{ijk}	Gibt an, welcher Anteil von Aufgabe i auf Station j vom Typ k bearbeitet wird

1 Einleitung

„Das Auto ist eine vorübergehende Erscheinung. Ich glaube an das Pferd.“

Wilhelm II., Deutscher Kaiser

Die Automobilindustrie befindet sich heute in einer vergleichbaren Situation wie die Kutschenhersteller des 19. Jahrhunderts: Zur Sicherung des unternehmerischen Erfolgs bedarf es mehr als nur der produkttechnischen Verbesserung einer bestehenden Idee. Um verbesserte Produkte auch effizient zu produzieren, bedarf es einer effizienten *Produktionsplanung und -steuerung* (PPS), der damit eine immer größere Bedeutung zukommt. Dabei werden mit hohem Investitionsaufwand hochautomatisierte, komplexe Produktionslinien geplant, die über viele Jahre bei höchster Verfügbarkeit die weltweite Nachfrage nach individueller Mobilität decken (Walla 2017). Insbesondere die in der vorliegenden Arbeit betrachtete Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und Produktionssystemplanung trägt diesbezüglich eine hohe Verantwortung und muss sich neuen Herausforderungen stellen. In diesem Kapitel wird auf die Motivation (1.1), die Ausgangssituation und Problemstellung (1.2) sowie die Zielsetzung (1.3) der Arbeit eingegangen. In einem letzten Abschnitt 1.4 wird der Aufbau dieser Arbeit erläutert.

1.1 Motivation

Produzierende Unternehmen im Allgemeinen stehen heute vor einer Vielzahl von Herausforderungen, um in einem globalen Markt in immer kürzerer Zeit innovative Produkte möglichst kostengünstig auf den Markt zu bringen (Albers & Lanza et al. 2022). In der Automobil- und Automobilzuliefererindustrie sind folgende Trends zu beobachten:

- T1** Die weltweite Entwicklung der Automobilindustrie zeigt ein starkes **Wachstum** über die vergangenen Jahre. Seit Aufzeichnung der Produktionsstatistik¹ durch die *International Organization of Motor Vehicle Manufacturers* (OICA) zur Jahrtausendwende hat sich die weltweite Fahrzeugproduktion von 39,8 Mio. Stück pro Jahr in 2000 auf ein Allzeithoch von 73,5 Mio. Stück im Jahr 2017 fast verdoppelt. Trotz eines Einbruchs aufgrund der Corona-Pandemie im Jahr 2020 weist die Branche mit durchschnittlich 2,1 % mehr produzierten Fahrzeugen gegenüber dem jeweiligen Vorjahr ein positives *year over year* Wachstum über die letzten 20 Jahre auf. Zusätzlich werden die entwickelten Gesamtsysteme immer **komplexer** (Albers 2023). Über die beteiligten Fachdisziplinen hinweg entsteht viel personengebundenes Wissen (Albers & Lanza et al. 2022), was eine große Herausforderung im Kontext des demographischen Wandels darstellt (Westkämper & Löffler 2016).

¹ Quelle: OICA <https://www.oica.net/production-statistics/> (besucht am: 01.10.2024)

- T2** Ein weiterer Komplexitätstreiber ist die stetig zunehmende **Variantenvielfalt**. Mit einer Ausdifferenzierung der Modellpaletten reagieren die Automobilhersteller auf den Kundenwunsch nach individuellen Produkten (Kampker & Kawollek et al. 2019). Eine Studie von Deloitte (2016) zeigt, dass sich die Anzahl an Modellen und Derivaten bei den meisten Herstellern innerhalb von 15 Jahren mehr als verdoppelt hat. Am Beispiel von Mercedes-Benz ist ersichtlich, wie sich aus 11 Baureihen im Jahr 2000 bis heute über 30 Baureihen mit einer Vielzahl an Karosserie- und Antriebsvarianten sowie unzähligen Konfigurationsmöglichkeiten entwickelt haben¹. Die automobiler Zuliefererindustrie muss diese Variantenvielfalt der *Original Equipment Manufacturers* (OEMs) aufgreifen und produziert unter hohem Kostendruck eine nur schwer beherrschbare Vielfalt von Kundenvarianten.
- T3** Die **chinesische Automobilindustrie** übt zusätzlichen Kostendruck auf den Rest der Welt aus. 39 % aller Fahrzeuge werden heute in China produziert. Zum Vergleich: Im Jahr 2000 waren es noch 13 %². Das unterstreicht die Relevanz der Volksrepublik für den weltweiten Markt, aber auch die Relevanz der circa 200 chinesischen Fahrzeughersteller, von denen knapp 60 % seit weniger als 10 Jahren bestehen (Munoz 2023). Die Geschwindigkeit der chinesischen Entwicklung ist folglich ein weiterer Faktor, den es zu beachten gilt: So hat sich der durchschnittliche **Produktzyklus** im Automobilsektor nach Deloitte (2016) von acht auf weniger als sechs Jahre verkürzt.

Produzierende Unternehmen sind folglich konfrontiert mit **hochfrequenten und immer kürzeren Entwicklungs- und Planungszyklen**. Aus Sicht der Produktionssystemplanung resultieren diese Entwicklungen letztlich in der Notwendigkeit **effizienter Planungsprozesse**, um der hohen Nachfrage **kundenspezifischer Varianten** bei einer möglichst kurzen *time to market* (TTM) zu begegnen.

1.2 Ausgangssituation und Problemstellung

Die vorliegende Arbeit betrachtet die **variantenspezifische Produktionssystemplanung**, wie sie bei direkten Zulieferern in der Automobilbranche vorkommt. Diese sog. *Tier 1* Automobilzulieferer produzieren neben Standardprodukten meist spezifisch angefragte Kundenvarianten aus einem sehr breiten Produktportfolio. Die hier betrachtete Planungsaufgabe wird dabei durch die Anfrage des Kunden ausgelöst (Schuh 2007). Um mit einem erfolgreichen Angebot zu einer Auftragsauslösung durch den OEM zu kommen, ist eine erste Abschätzung der Fertigungskosten durch den Zulieferer durchzuführen. Hierzu verwendet dieser im Rahmen der Grobplanung eines idealen Produktionssystems die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden

¹ Quelle: ADAC <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/> (besucht am: 01.10.2024)

² Quelle: OICA <https://www.oica.net/production-statistics/> (besucht am: 01.10.2024)

Auftragsdetails und Informationen über den aktuellen Produktentwicklungsstand (Hagemann 2022). Neben der Gesamtfahrzeugentwicklung der Baureihen sind die Fachbereiche des OEM (z. B. Karosserie, Chassis und Achsen, Fahrwerk, Antrieb etc.) auch für die Entwicklung der Teilsysteme zuständig (Hab & Wagner 2017). In einem ersten Schritt bewertet der Zulieferer folglich mit wenig Einfluss auf das Produktdesign des OEM die Produzierbarkeit der angefragten Kundenvariante und plant das zugehörige Produktionssystem. Dieser Prozess lässt sich in der betrachteten **Ausgangssituation** wie folgt charakterisieren¹:

Aufgabe der Planung: Aufgrund der Nachfrage der Kunden nach der Herstellung sehr hoher Stückzahlen über viele Jahre hinweg betrachten die Zulieferer die Neuplanung eines variantenspezifischen Produktionssystems. Das meist hochautomatisierte System muss lediglich beim Produktionshochlauf skaliert werden und läuft anschließend mit höchster Verfügbarkeit oft 7 Tage die Woche (Walla 2017).

Scope der Planung: Die Planung fokussiert den variantenspezifischen Teil der Produktion. Dabei handelt es sich um die hochautomatisierten Linien in einer bereits existierenden Fabrik, die zur Fertigung und Montage einzelner Kundenvarianten geplant, beschafft und in Betrieb genommen werden. Das bedeutet, dass über verschiedene Varianten hinweg gemeinsam genutzte Gewerke wie z. B. ein Presswerk nicht neu geplant werden. Für die hier anfallenden Fertigungskosten werden Pauschalen verwendet.

Grundlage der Planung: Die Grundlage für die Planung bilden die vorliegenden Produkt- und Auftragsinformationen (Hagemann 2022). Der Planer² versucht Ähnlichkeiten zwischen neu angefragten und bereits produzierten Produktvarianten zu nutzen, um sich an der Planung ähnlicher Varianten zu orientieren. Die Standortentscheidung wird nicht in direktem Zusammenhang mit der betrachteten Planungsaufgabe getroffen. Die Grundlage dafür wird vereinfacht über standortspezifische Parameter (z. B. Lohnkosten) abgebildet. Im Allgemeinen werden in dieser frühen Phase der Planung viele Zusammenhänge über Parameter abstrahiert (z. B. der Zusammenhang zwischen Produktfeatures und Bearbeitungszeiten). Detaillierte Simulationen können aufgrund der begrenzten Informationsverfügbarkeit (noch) nicht durchgeführt werden.

Diese betrachtete Planungsaufgabe umfasst vier Schritte, bei welchen in der Industrie aktuell **folgende Probleme** auftreten, die mit dem hier vorliegenden, neuartigen Forschungsansatz aufgegriffen werden sollen¹:

¹ Ergebnis einer Befragung im Rahmen des vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung* (BMBF) öffentlich geförderten Verbundprojekts „*Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems*“ (MoSyS) vgl. Schäfer & Günther et al. (2023)

² Zur besseren Lesbarkeit verzichtet diese Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen. Es wird das generische Maskulinum verwendet, wobei alle Geschlechter gleichermaßen gemeint sind.

Problem 1. Schritt: Die vorliegenden Produktinformationen sind zum betrachteten Zeitpunkt häufig nicht vollständig, wenig detailliert oder unterliegen Änderungen. Der Zulieferer hat meist wenig Einfluss auf das Produktdesign der angefragten Kundenvariante. Die produzierten Varianten sind funktional ähnlich, jedoch haben Unterschiede in Gestalt und Aufbau großen Einfluss auf die Prozess- und Produktionssystemplanung.

Problem 2. Schritt: Die auf die Produktanalyse folgende Prozessplanung erfolgt erfahrungsbasiert und dieses implizite Know-How als Erfahrungswissen über Zusammenhänge zwischen Produkteigenschaften und notwendige Produktionsprozesse ist häufig personengebunden. Dabei ist die Technologieauswahl besonders beim Fügen von Baugruppen komplex und abhängig von nicht explizit in den Produktdaten vorhandenen Metainformationen (z. B. Fügeverbindungen wie Schweißnähte).

Problem 3. Schritt: Die dokumentbasierte Optimierung des Produktionssystems (z. B. in Excel) erfordert viel Zeit und ist von manuellen Aktivitäten geprägt. So können bei der manuellen Austaktung einer Linie (engl. *Assembly Line Balancing*) von dem Planer nicht mehrere, in der Praxis relevante Zielkriterien (wie bspw. Kosten, Zeit, Qualität und Flexibilität) gleichermaßen berücksichtigt werden. Die Planung beschränkt sich daher nach außen hin rein auf die Herstellkosten. Die Möglichkeit eines quantitativen, multikriteriellen Vergleichs alternativer Lösungen bleibt aus.

Problem 4. Schritt: Das Planungsergebnis liegt schließlich dezentral in verschiedenen Dokumenten und heterogenen Werkzeugen oder *File Servern* vor. Folglich werden keine digitalen Modelle erzeugt, die in nachfolgenden Planungsphasen (z. B. der Detail-Layoutplanung), als digitaler Schatten bei der Inbetriebnahme oder als digitaler Zwilling während dem realen Betrieb genutzt werden können.

1.3 Zielsetzung

Um der Problemstellung zu begegnen, ist eine digitale Assistenz des Menschen bei der Produktionsplanung erforderlich. Die **assistierte Produktionssystemplanung** hat dabei die Unterstützung des Menschen durch den Einsatz digitaler Methoden und Werkzeuge zum Ziel (vgl. VDI 4499 2008). Hierzu verfolgt der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz durch eine assistierte und damit effizientere Produktionssystemplanung das quantitative Ziel **Kosten und Zeit** in der repetitiven Planung variantenspezifischer Produktionslinien einzusparen. Weiter sollen qualitative Aspekte berücksichtigt werden: Dazu zählt einerseits die Möglichkeit zur Formalisierung von implizitem Wissen über Zusammenhänge zwischen Produkt und Produktion. Andererseits umfasst das die Erzeugung eines multikriteriell optimierten Planungsergebnisses, welches als Output weiteren Planungsphasen zur Verfügung steht. Vor diesem Hintergrund ist das erklärte Ziel der vorliegenden Arbeit die **Entwicklung eines**

ganzheitlichen Ansatzes zur assistierten, modellbasierten Grobplanung von Produktionssystemen mittels Mehrzieloptimierung. Hierfür verfolgt diese Forschungsarbeit die folgenden vier Teilziele:

- Z1** Der Ansatz basiert auf den vorliegenden Produktdaten und berücksichtigt Ähnlichkeiten zwischen Produkten bzw. Varianten abhängig von der vorliegenden Datenbasis.
- Z2** Der Ansatz erlaubt eine modellbasierte Abbildung der Zusammenhänge zwischen Produkt, Prozess und Produktionssystem und befähigt damit in der Planung die Ableitung der zur Fertigung und Montage notwendigen Produktionsprozesse und deren Abfolgestriktionen.
- Z3** Der Ansatz optimiert im Rahmen der Austaktung des Produktionssystems die Zuordnung der Prozessschritte zu den Stationen unter Betrachtung mehrerer Optimierungskriterien und bildet das in der Realität vorliegende Problem dabei mathematisch ausreichend detailliert ab.
- Z4** Die Planung erzeugt ein digitales (Simulations-) Modell, welches das Planungsergebnis visualisiert und als Grundlage für fortführende Planungsphasen dient.

Inwieweit die vorliegende Arbeit diese Zielsetzung erfüllt, wird im Rahmen der Anwendung des vorgestellten Ansatzes am Beispiel der Planung bei einem Tier 1 Zulieferer überprüft.

1.4 Aufbau der Arbeit

Das nachfolgende Kapitel 2 beinhaltet neben einer Einordnung der Arbeit in die Aufgaben der Produktionsplanung die für diese Arbeit relevanten methodischen Grundlagen aus den Bereichen Modellierung, Optimierung und Simulation. Weiter wird im Zwischenfazit 2.3 der Forschungsgegenstand der vorliegenden Arbeit konkretisiert. Darauf aufbauend bewertet Kapitel 3 den aktuellen Stand der Forschung zur assistierten Produktionssystemplanung, identifiziert das vorliegende Forschungsdefizit und leitet vier zentrale Forschungsfragen ab. Diese werden von dem in Kapitel 4 vorgestellten eigenen Ansatz aufgegriffen. Dieser gliedert sich in die vier aufeinander aufbauenden Bestandteile der Produktanalyse (Kapitel 4.1), der Systemmodellierung zur Ableitung des Prozessvorranggraphen (Kapitel 4.2), der Optimierung der Produktionsfolge (Kapitel 4.3) und der modularen Visualisierung und Simulation des resultierenden Produktionssystems (Kapitel 4.4). In Kapitel 5 wird der eigene Ansatz am Beispiel der Planung bei einem Tier 1 Automobilzulieferer angewandt. Eine Diskussion der entwickelten Methode und der erhaltenen Erkenntnisse sowie die Darstellung möglicher Erweiterungen erfolgt in Kapitel 6. Kapitel 7 schließt mit einer Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel dient der Präzisierung des Forschungsgegenstands. Hierzu wird die im vorausgehenden Kapitel diskutierte Problemstellung anhand relevanter, theoretischer Grundlagen im Gesamtkontext positioniert. Es wird sowohl auf thematische Grundlagen der Produktionssystemplanung (Kapitel 2.1) als auch methodische Grundlagen der Modellierung (Kapitel 2.2) eingegangen. Die Unterkapitel folgen dem Vorgehen vom Groben ins Feine und leiten vom Gesamtkontext in den spezifischen Forschungsgegenstand der vorliegenden Arbeit über. Kapitel 2.3 schließt mit einem Zwischenfazit und fasst die zentrale Aufgabenstellung, die diese Forschungsarbeit aufgreift, zusammen.

2.1 Produktionssystemplanung

Dieses Kapitel beinhaltet die thematischen Grundlagen der Produktionssystemplanung. Der Begriff *Planung* steht für die systematische Analyse einer Ausgangssituation und die Ableitung möglicher Handlungsalternativen für eine zielgerichtete Bewertung und Auswahl (Boysen 2005). Die Analyse der Ausgangssituation kann im Rahmen dieser Arbeit als die Analyse des zu fertigenden Produkts betrachtet werden. Die Vorwegnahme von Handlungsalternativen beschreibt dabei die kreative Gestaltung des Produktionsapparates, der zur Herstellung des betrachteten Produkts notwendig ist. Die resultierenden Aufgaben der Produktionssystemplanung werden in diesem Kapitel in den Gesamtkontext des Planungsprozesses eingeordnet (Kapitel 2.1.1) und im Detail beschrieben (Kapitel 2.1.2). Diesbezüglich wirkt Kapitel 2.1.3 ergänzend und führt in den Themenkomplex der Optimierung von Produktionssystemen ein. Folglich charakterisiert dieses Kapitel 2.1 die zentrale Aufgabe der vorliegenden Arbeit durch eine Einordnung des Betrachtungsgegenstands in die Prozesse und Aufgaben der Produktionssystemplanung.

2.1.1 Einordnung der Produktionssystemplanung in den Planungsprozess

Die Produktionsplanung hat viele Dimensionen: So wird die Produktionsplanung in der Literatur meist in langfristige, mittelfristige und kurzfristige Aufgaben gegliedert (Bischoff & Warnecke et al. 1999 und Schuh & Stich 2012). Dabei steht die Systemplanung sowohl im Bezug auf den *Produktentstehungsprozesses* (PEP) als auch im Bezug auf den Lebenszyklus einer Fabrik immer am Anfang. Die Systemplanung geht dem Aufbau (Systemrealisierung), Anlauf (Systemeinführung), Betrieb (Systemnutzung) und Abbau (Systemverwendung/-verwertung) voraus und hat die technische, funktionale und wirtschaftliche Entwicklung eines Systems zum Ziel (Schenk & Wirth et al. 2014).

Eine weitere Dimension zur Strukturierung von Planungsaufgaben sind die Ebenen der Produktion nach Wiendahl & Reichardt et al. (2014). Diese werden in Abbildung 2.1 visualisiert. Im Kontext der Produktionsplanung gilt, dass die Aufgaben der Planung vom jeweiligen Betrachtungsgegenstand d. h. der jeweiligen Ebene abhängig sind. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der **Planung von Produktionssystemen** (Ebene 1 und 2). Eine Fabrikplanung (Ebene 3) oder gar die Produktionsnetzwerkplanung (Ebene 4) werden nicht betrachtet.

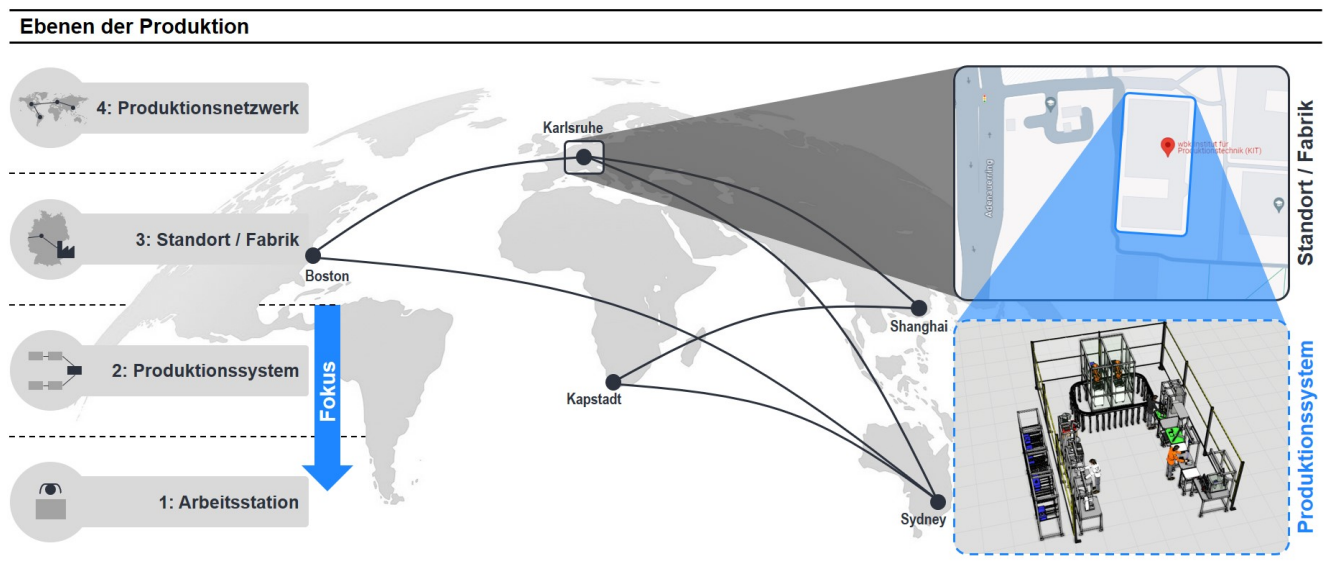


Abbildung 2.1: Die Ebenen der Produktion nach Wiendahl & Reichardt et al. (2014) (eigene Darstellung).

Eine letzte Dimension der Planung, auf die an dieser Stelle eingegangen werden soll, ist die Unterscheidung nach dem Planungsszenario: Eversheim (2002) differenziert hierbei zwischen der Produktionssystemplanung d. h. der **Neuplanung** eines Produktionssystems und der Produktionsablaufplanung – kurz **Ablaufplanung**. Dieser Unterschied kann Abbildung 2.2 entnommen werden. Auf Ebene der Fabrikplanung wird in der Literatur oft auch zwischen Greenfield- und Brownfield-Planung unterschieden. Auf Ebene der Produktionssystemplanung ist diese Unterscheidung jedoch weniger eingängig, da sowohl die Neu- als auch die Ablaufplanung immer innerhalb der Fabrik und nicht auf dem Feld (engl. *field*) stattfindet und damit zu Fehlinterpretationen führen könnte. Die **Ablaufplanung** befasst sich mit der Erstellung von Arbeitsplänen während der Betriebsphase eines Produktionssystems (Eversheim 2002). Eine zentrale Herausforderung ist dabei das sog. *Scheduling* von Produktionsaufträgen. Dieses beschreibt die Aufgabe der Festlegung welcher Auftrag zu welchem Zeitpunkt an welcher Station in bestehenden Produktionssystemen bearbeitet werden soll. So ist bspw. die Auftragsdisposition (engl. *Dispatching*) d. h. die Steuerung des Transports eines Auftrags durch das Produktionssystem eine zentrale Herausforderung der Ablaufplanung (Dangelmaier 2009), welche in dieser Arbeit jedoch keine weitere Aufmerksamkeit findet. Bei

der **Produktionssystemplanung**, welche hier betrachtet wird, geht es um die Planung eines neuen Produktionssystems vor dessen Beschaffung, Aufbau, Inbetriebnahme etc. Der Begriff *Produktionssystemplanung* steht damit im Kontext dieser Arbeit immer für die produkt- bzw. variantenspezifische Neuplanung eines Produktionssystems, wie in Abbildung 2.2 am Beispiel einer Produktionslinie dargestellt. Die Begriffe *Produktionslinie* und *Produktionssystem* werden im Rahmen dieser Arbeit oft als Synonym verwendet, da sie die gleiche Ebene der Produktion nach Wiendahl & Reichardt et al. (2014) adressieren. Die Produktionslinie ist dabei ein Beispiel für die Umsetzung des Fließprinzips – eines der fünf industriellen Fertigungsprinzipien nach Wiendahl & Reichardt et al. (2014) und wird in Kapitel 2.1.3 nochmals aufgegriffen.

Um die Phasen der Produktionssystemplanung zu spezifizieren, existieren in der Literatur eine Vielzahl von Modellen zur Beschreibung der Phasen von Planungsverfahren im *Produktentstehungsprozess* (PEP). Eine Analyse der Beschreibungsmodelle nach Bullinger (1986), REFA (1990), Schmigalla (1995), Eversheim & Schuh (1999), Eversheim (2002), Dangelmaier (2003), Pieper (2008), Grundig (2015), Pawellek (2014) und Feldmann (2014) ergibt nach Hagemann (2022), dass sich die Phasen Konzeptplanung, Grobplanung und Detailplanung verallgemeinern lassen. Das Ergebnis der Analyse ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

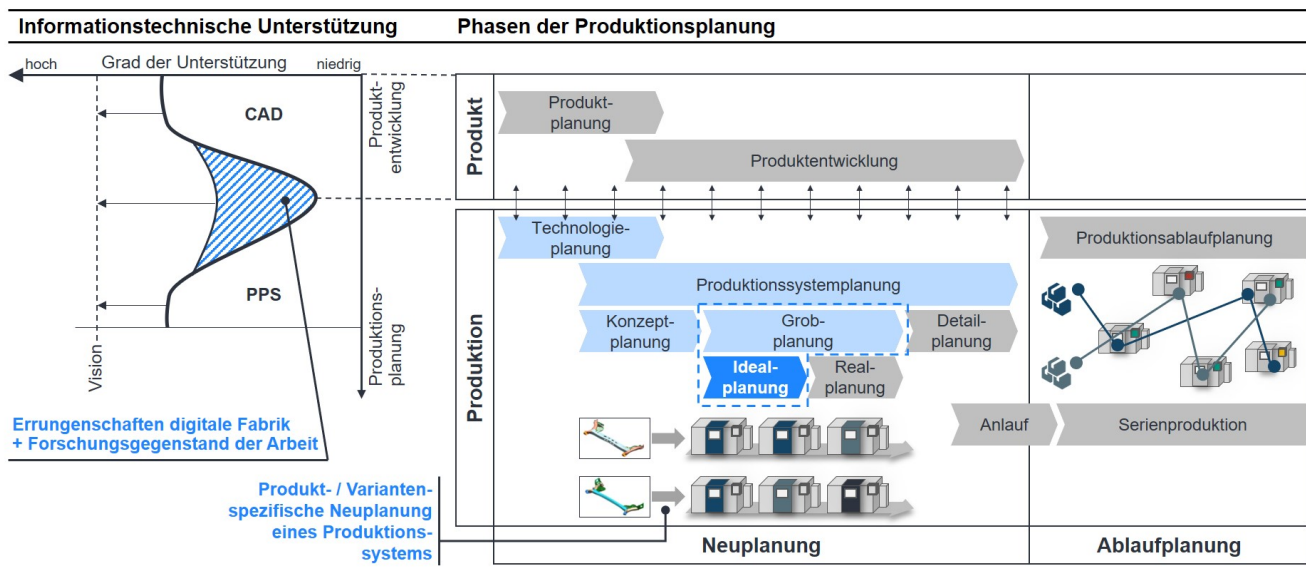


Abbildung 2.2: Die Phasen der Produktionsplanung (eigene Darstellung in Anlehnung an Kiefer & Breckle et al. 2018) mit Unterscheidung zwischen Neu- und Ablaufplanung nach Eversheim (2002) und dem Grad der informationstechnischen Unterstützung (eigene Darstellung in Anlehnung an Klauke 2002).

Nach dem Prinzip vom Groben ins Detail befasst sich die Konzeptplanung zunächst mit dem Vergleich verschiedener Produktionskonzepte während der Produktplanung (Eversheim 2002). Zu diesem Zeitpunkt existieren meist nur sehr wenige Produktdaten (Burr 2008). Die

nachfolgende **Grobplanung** basiert dann auf dem aktuellen Produktentwicklungsstand. Es stehen meist erste Geometrieinformationen wie bspw. *Computer-Aided Design* (CAD) Daten, Stücklisten und erste Auftragsdetails wie bspw. geplante Produktionsvolumina zur Verfügung. Diese sind jedoch in der frühen Phase der Produktionssystemplanung oft nicht vollständig, wenig detailliert oder unterliegen großen Änderungen. Aus diesem Grund folgt die Grobplanung dem Vorgehen der Planung vom idealen zum realen Produktionssystem. Diese beiden Phasen unterscheiden sich vorrangig bzgl. der Berücksichtigung von Randbedingungen: Die Idealplanung hat die Planung eines von räumlichen Restriktionen unabhängigen Produktionssystem zum Ziel, während die Realplanung die darauffolgende Integration aller zu diesem Zeitpunkt bekannten Restriktionen (z. B. Laufwege, Gebäudestrukturen wie tragende Säulen etc.) in den Planungsstand umfasst. (Grundig 2015) Die Unterscheidung zwischen Ideal- und Realplanung hat häufig auch mit dem einhergehenden, unterschiedlichen Aufwand der Planung zu tun. Gesamtheitliches Ziel der Grobplanung ist die Erstellung eines optimalen Produktionssystementwurfs basierend auf den zur Verfügung stehenden Produktinformationen. Die Idealplanung vereinfacht diesen Entwurf, um Zeit in der Erstellung des Entwurfs einzusparen und möglichst schnell zu einer ersten Kostenabschätzung zu kommen. Es ist von zentraler Bedeutung zu verstehen, dass die vorliegende Arbeit die möglichst effiziente, **ideale Grobplanung** eines (variantenspezifischen) Produktionssystems noch am Tag der Anfrage eines Kunden thematisiert. Die Reduktion der Planungszeit ist hier besonders relevant. Die Feinplanung befasst sich schließlich mit Aufgaben wie bspw. der Detail-Layoutplanung oder der detaillierten Ausplanung einzelner Stationen (Eversheim 2002). Es ist folglich von Vorteil, wenn in der Grobplanung bereits digitale Modelle erzeugt werden, die in den nachfolgenden Planungsphasen weiter genutzt werden können.

Es ist anzumerken, dass die Planungsphasen in der industriellen Praxis meist nicht rein sequenziell durchlaufen werden, wenngleich die analysierten Standardwerke (siehe oben) die visuelle Darstellung als Phasenmodelle wählen. Eine reale Anwendung ist aufgrund von sich konstant ändernden Randbedingungen vielmehr durch einen stark iterativen Prozess geprägt (Burr 2008). Oft ist daher die Rede von einer integrierten Produktionsplanung (Gausemeier & Lanza et al. 2012). Albers & Lanza et al. (2022) führt zur Betonung dieser Integration von Produktentwicklung und Produktionsplanung den Begriff *Produkt-Produktions-CoDesign* (PPCD) ein. Die vorliegende Arbeit befasst sich jedoch lediglich mit der Gestaltung produktionsseitiger Freiheitsgrade und dem Ziel der effizienten, **variantenspezifischen Produktionssystemplanung** basierend auf den zur Verfügung stehenden Produktdaten. Diese frühe Phase der Grobplanung ist heute stark geprägt von manuellen Planungsaktivitäten, die einen hohen Aufwand erzeugen. Ein Beitrag dieser Forschungsarbeit ist daher die Lücke im Grad der informationstechnischen Unterstützung zwischen Produkt und Produktion durch eine Assistenz des Menschen bei der Produktionssystemplanung zu schließen (siehe Abbildung 2.2 links).

Dabei ist die rechnergestützte bzw. **assistierte Produktionssystemplanung** nach VDI 4499 (2008) als Teildisziplin der digitalen Fabrik definiert. Eine Analyse von Ansätzen zur rechnergestützten bzw. assistierten Produktionsplanung in Hagemann (2022) zeigt deren enge Verwandtschaft mit den Aufgaben des durchgängig digitalen Engineerings nach Kerber (2016), ebenfalls definiert als Teil der digitalen Fabrik nach VDI 4499 (2008). Als Standardwerke stellen Dangelmaier (2003), Kühn (2006), Bracht & Geckler et al. (2011) und Westkämper & Spath et al. (2013) ausgewählte Methoden und Werkzeuge der digitalen Fabrik vor. In diesem Kontext wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit unter der assistierten Produktionssystemplanung der Einsatz digitaler Methoden und Werkzeuge zur rechnergestützten Unterstützung des Menschen bei der Produktionssystemplanung verstanden. Wie bereits in Hagemann (2022) unterschieden, ist die Unterstützung dabei im Sinne einer Assistenz des Menschen bei der Durchführung und nicht einer (Voll-) Automatisierung der Planungsaufgabe zu verstehen. Eine genauere Betrachtung der Planungsaufgaben wird im folgenden Kapitel 2.1.2 diskutiert.

2.1.2 Aufgaben der Produktionssystemplanung

In der produktionsplanerischen Begriffsdefinition unterscheidet Stoll (2017) zwischen der *Technologie*, dem *Prozess* und der *Produktion*. Die (Zwischen-) Ergebnisse der Planungsphasen ergeben sich entsprechend als *Technologiekette*, *Prozesskette* und *Produktionsfolge*. Der Technologiebegriff ist in der Literatur viel diskutiert und wird nach Stoll (2017) in der Produktionsplanung als Synonym zur *Fertigungstechnologie* bzw. dem *Fertigungsverfahren* nach DIN 8580 (2003) verstanden. Die betriebsmittelunabhängige Technologieplanung befasst sich mit der Entscheidung über den Technologieeinsatz d. h. welche Technologien zu welchem Zeitpunkt und zu welchem Zweck zum Einsatz kommen sollen und geht der Grobplanung voraus (Schuh & Stich et al. 2011). Die zum Zeitpunkt der Grobplanung vorliegenden Produktinformationen ermöglichen dem Planer 1. **die Festlegung der notwendigen Produktionsprozesse** und 2. **eine Zuweisung zu Stationen** im Sinne einer Produktionsfolge (Hagemann 2022). Im Folgenden wird auf diese beiden Aufgaben genauer eingegangen.

Die **erste Aufgabe der betriebsmittelunabhängigen Auswahl geeigneter Produktionsprozesse** basierend auf Produktinformationen lässt sich gemäß einer Unterscheidung zwischen den Hauptgruppen der DIN 8580 charakterisieren (DIN 8580 2003). In der Literatur wird die *Produktion* oft als Summe aus *Teilefertigung* und *Montage* gesehen. Da der Begriff Montage an anderer Stelle jedoch als manuelles Montieren d. h. als *Zusammensetzen* (Hauptgruppe 4.1 DIN 8593 Teil 1) oder *An- und Einpressen* (Hauptgruppe 4.3 DIN 8593 Teil 3) verstanden wird, verzichtet diese Forschungsarbeit auf diese unpräzise Unterscheidung. Vielmehr wird im Rahmen dieser Arbeit zwischen der **Teilefertigung** (Hauptgruppen 1-3 nach DIN 8580) und dem **Fügen** (Hauptgruppe 4 nach DIN 8580) unterschieden.

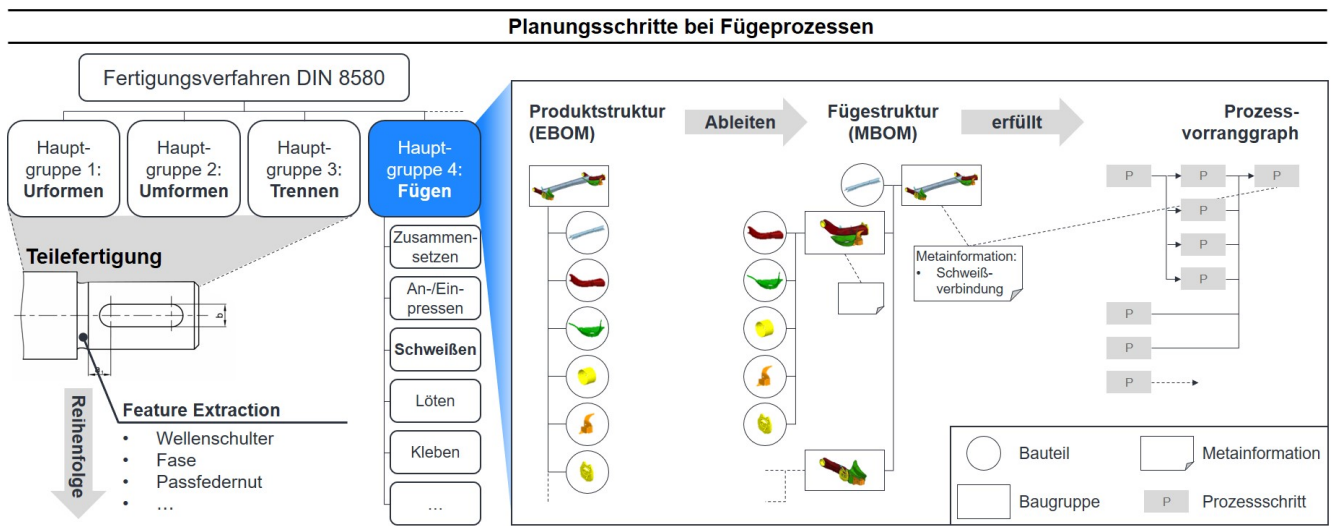


Abbildung 2.3: Die ersten vier Hauptgruppen der DIN 8580 mit Fokus auf die Aufgabe der Planung von Fügefolgen nach Burr (2008) (eigene Darstellung).

Bei der Teilefertigung werden explizit modellierte Features aus bspw. digitalen CAD-Modellen oder Zeichnungen extrahiert. Diese müssen anschließend lediglich in eine produzierbare Reihenfolge gebracht werden (siehe Abbildung 2.3 links). Der Zusammenhang zwischen Produktfeatures und Fertigungsverfahren ist z. B. durch den *STandard for the Exchange of Product model data* (STEP) gegeben (ISO 10303 2006 AP224). In der Planung von **Fügaufgaben** (Abbildung 2.2 rechts) wird mit Fügestrukturen gearbeitet. Aus der Produktstruktur (engl. *Engineering Bill Of Materials* (EBOM)) wird eine Fügestruktur (engl. *Manufacturing Bill Of Materials* (MBOM)) abgeleitet. (Burr 2008) Diese Fügestruktur erfüllt den sog. **Prozessvorranggraphen**. Die Fügestruktur ist dabei abhängig von nicht explizit modellierten Metadaten über den Zusammenbau der Baugruppe. Ein Beispiel dafür ist eine in CAD-Modellen nicht enthaltene Schweißnaht, die ein oder mehrere Bauteile verbindet. Solche Metainformationen lassen sich nicht direkt aus den üblicherweise vorliegenden Produktinformationen extrahieren (Hagemann & Sünnetcioglu et al. 2019). Das stellt eine zusätzliche Herausforderung in der Planung von Fügefolgen dar. Der Prozessvorranggraph enthält dabei nur die technischen Vorrangbeziehungen (auch Abfolgerestriktionen genannt), die keinesfalls verletzt werden dürfen und lässt daher meist mehrere mögliche Fügefolgen zu, wie Abbildung 2.4 darstellt.

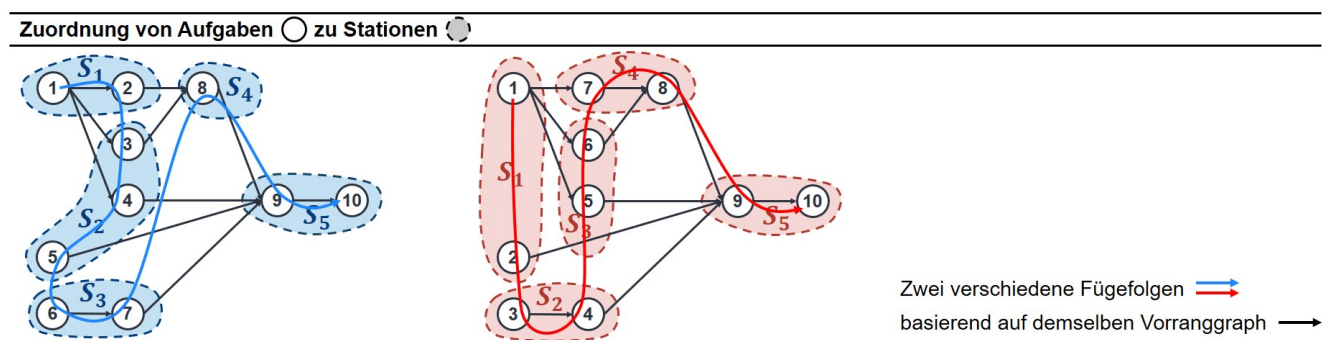


Abbildung 2.4: Traversierung (eigene Darstellung nach Schäfer & Kochendörfer et al. 2023).

Die Frage, welche Fügefolge *die beste* ist, ergibt sich im Rahmen der sog. Traversierung des Prozessvorranggraphen. Das ist Inhalt der **zweiten Aufgabe der betriebsmittelbezogenen Ableitung der Fügefolge** (i. A. der Produktionsfolge). Dabei werden die einzelnen Fügeaufgaben durch eine Zuweisung zu Stationen in eine Reihenfolge gebracht. Der Vorranggraph schränkt die Zuweisung hierbei durch die enthaltenen Vorrangbeziehungen ein. Am Beispiel des Fügens durch Schweißen (Hauptgruppe 4.6 DIN 8593 Teil 6) ist die Zuweisung aufgrund der Teilbarkeit von Schweißnähten darüber hinaus **nicht-diskret**. Das resultierende Zuweisungsproblem wird folglich sehr schnell sehr komplex. Um trotzdem *die beste* Fügefolge zu ermitteln und das Produktionssystem optimal zu planen, eignet sich der Einsatz mathematischer Verfahren. Auf diese wird im folgenden Kapitel 2.1.3 eingegangen.

2.1.3 Optimierung von Produktionssystemen

Nach Domschke & Drexl et al. (2015) befasst sich das *Operations Research* (OR) mit der Analyse praxisnaher, komplexer Problemstellungen und dem Ziel durch den Einsatz mathematischer Methoden möglichst gute Entscheidungen zu treffen. Hierfür wird das reale Problem in ein Optimierungsmodell übersetzt, um mithilfe eines Algorithmus eine möglichst gute Lösung für das vorliegende Problem zu determinieren. Die Formulierung eines mathematischen Modells besteht dabei immer aus den vier Bestandteilen Variable(n), Parameter, Zielfunktion und Nebenbedingung(en). (Domschke & Drexl et al. 2015) Abhängig von der Art der mathematischen Modellformulierung ergeben sich unterschiedliche Problemklassen (Kapitel 2.1.3.1), zu deren Lösung verschiedene Algorithmen (Kapitel 2.1.3.2) herangezogen werden können. In Kapitel 2.1.3.3 wird zuletzt auf das sog. (Robotic) Assembly Line Balancing Problem eingegangen, welches die in dieser Arbeit betrachtete Zuweisung von Fügeaufgaben zu Stationen beschreibt.

2.1.3.1 Klassifikation der Problemklasse

Die in dieser Arbeit vorliegende **lineare Optimierung** befasst sich mit der Lösung mathematischer Probleme, die durch eine lineare Zielfunktion charakterisiert sind und unter Beachtung linearer Nebenbedingungen (auch *Constraints* genannt) maximiert oder minimiert werden sollen. Die bei der Modellierung verwendeten Variablen heißen Entscheidungsvariablen. (Nickel & Rebennack et al. 2022) Wenn die Entscheidungsvariablen ausschließlich ganzzahlige, natürliche oder binäre Werte annehmen können, spricht man von der **ganzzahligen (linearen) Optimierung** – im Englischen auch *Integer Programming* (IP) genannt. Viele reale Problemstellungen lassen sich mit dieser Einschränkung jedoch nicht abbilden. Probleme, bei deren Modellierung sowohl ganzzahlige als auch kontinuierliche Variablen verwendet werden, können der **gemischt-ganzzahligen (linearen) Optimierung**, englisch *Mixed-Integer (linear) Programming* (MILP), zugeordnet werden. MILP – wie das in dieser Arbeit betrachtete

Problem – sind im Allgemeinen NP -schwer und gehören damit zu den mathematisch am schwierigsten zu lösenden Probleme. (Nickel & Rebennack et al. 2022)

2.1.3.2 Klassifikation der Lösungsalgorithmen

Mathematisch kann bewiesen werden, dass die zulässige Menge eines **linearen Optimierungsproblems** stets ein konvexes Polyeder ist. Zur Lösung linearer Probleme wird klassischerweise der sog. **Simplex-Algorithmus** verwendet. Dieser sucht die Ecken der zulässigen Menge nach dem größten Gradienten der Zielfunktion ab. Gefundene Optimalpunkte sind dann solche Punkte, die in Richtung benachbarter Ecken einen Abstieg des Zielfunktionswertes erfordern. Da der Simplex-Algorithmus *lineare Programme* (LP) in durchschnittlich polynomialer Zeit und damit vergleichsweise kurzer Zeit löst (Domschke & Drexl et al. 2015), wird bei **gemischt-ganzzahligen linearen Problemen** das Ausgangsproblem meist iterativ mittels LP-Relaxierungen gelöst, bis die gefundene Lösung die Ganzzahligkeitsbedingung erfüllt (Nickel & Rebennack et al. 2022). Das **Branch-&Bound**-Verfahren ist ein Grundverfahren zur Lösung von MILP, welches nach diesem Prinzip vorgeht: Ausgehend vom Ausgangsproblem P_0 wird zunächst die zugehörige LP-Relaxierung P'_0 gelöst. Besitzt P'_0 eine nicht-ganzzahlige Lösung, so wird an dieser Stelle eine Verzweigung angelegt (sog. *Branching*). Die resultierenden Subprobleme (z. B. P_1 und P_2) können schließlich erneut LP-relaxiert und mit dem Simplex-Algorithmus gelöst werden. Bei einem Maximierungsproblem stellen alle gefundenen nicht-ganzzahligen bzw. ganzzahligen Lösungen obere bzw. untere Schranken an die optimale Lösung dar (sog. *Bounding*). Die gefundene Optimalitätslücke (engl. *gap*) kann bspw. genutzt werden, um ganze Äste des Lösungsbaums abzuschneiden. Nach diesem Schema wird der gesamte Baum durchsucht, bis die beste ganzzahlige Lösung feststeht und der Algorithmus terminiert. (Nickel & Rebennack et al. 2022) Standard-Algorithmen wie u. a. der *Branch-&Bound*-Algorithmus sind in (teilweise open-source) verfügbaren Default Solvern implementiert. Ein **Default Solver** entscheidet bei der Lösung des mathematischen Problems selbst darüber, welche Algorithmen eingesetzt werden. Durch die Fortschritte in der Solver-Entwicklung können Probleme der Größenordnung realer Anwendungsfälle heute realistisch exakt gelöst werden (Boysen & Schulze et al. 2022). Beispiele für leistungsfähige Solver sind *Gurobi*, *IBM ILOG CPLEX* und *FICO XPRESS Optimizer*, die gemäß der Versuche in Jablonský (2015) alle ähnlich performen.

Bei den bisher erwähnten Lösungsalgorithmen handelt es sich um sog. **exakte Verfahren** zur Lösungsbestimmung. Da gemischt-ganzzahlige (lineare) Probleme im Allgemeinen NP -schwer sind, erfordert deren Lösung exponentiellen Rechenaufwand. Neben exakten Verfahren, die folglich in endlicher Rechenzeit optimale Lösungen bestimmen, existieren **heuristische Verfahren**, die in vertretbarer (polynomialer) Rechenzeit gute zulässige Lösungen bestimmen (Nickel & Rebennack et al. 2022). Heuristiken kommen meist dann zum Einsatz,

wenn die reale Problemgröße einen gewissen Schwellenwert übersteigt und lassen sich in drei Kategorien unterteilen: Konstruktionsheuristiken zur Ermittlung zulässiger Punkte, Verbesserungsheuristiken zur Verbesserung zuvor ermittelter zulässiger Punkte und Heuristiken zur Bestimmung von Schranken, die nach oberen beziehungsweise unteren Schranken des optimalen Zielfunktionswerts suchen. Metaheuristiken bieten dabei ein allgemeines, problemunspezifisches heuristisches Verfahren, das sich auf viele Probleme anwenden lässt. Sie lassen sich nach Faramarzi & Heidarinejad et al. (2020) in die vier Klassen evolutionäre Algorithmen, Schwarmintelligenz, physikbasierte Ansätze und menschenbasierte Methoden gruppieren. Der **Genetische Algorithmus** gehört zu den evolutionären Algorithmen und umfasst nach Srinivas & Patnaik (1994) die sechs in Abbildung 2.5 links dargestellten Schritte.

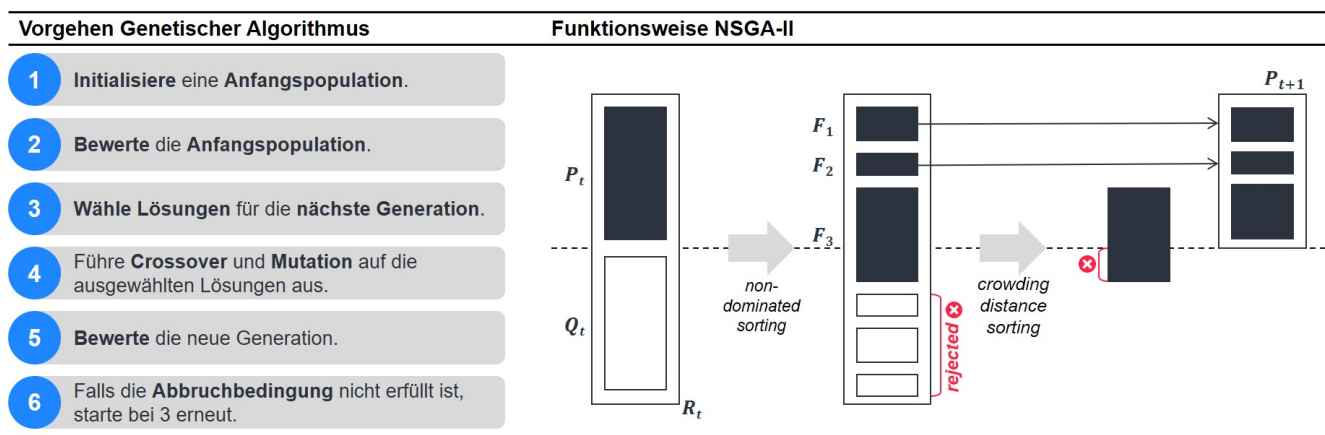


Abbildung 2.5: Funktionsweise Genetischer Algorithmus und NSGA-II (eigene Darstellung in Anlehnung an Verma & Pant et al. 2021).

Ein prominentes Beispiel für einen genetischen Algorithmus ist der *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) nach Deb & Pratap et al. (2002), welcher die Möglichkeit bietet, ein Problem mit **mehreren Zielfunktionen** unter Einhaltung gegebener Nebenbedingungen zu lösen. Es handelt sich dabei um einen nicht-dominierten Sortieralgorithmus in Bezug auf den Rang in der Pareto-Ordnung. Hierzu wird gemäß Verma & Pant et al. (2021) nach folgendem Schema vorgegangen (Abbildung 2.5 rechts): Durch genetische Variationen wie bspw. Selektion, Crossover und Mutation entsteht aus der Anfangspopulation P_t mit der Größe N eine neue Population Q_t . Diese beiden Populationen kombiniert der Algorithmus zu R_t , in der eine nicht-dominierte Sortierung¹ abläuft und einzelne Schichten mit entsprechenden Rängen entstehen. Daraufhin folgt die Berechnung der sog. Verdrängungsdistanz. Bei der Auswahl der nächsten Generation werden N Lösungen in die Population P_{t+1} aufgenommen. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis die Abbruchbedingung erfüllt ist.

¹ Bei der nicht-dominierten Sortierung wird jede Lösung auf ihre Pareto-Dominanz geprüft. Alle nicht-dominierten Lösungen bilden den ersten Rang. Dieser Vorgang wird mit den verbleibenden Lösungen wiederholt, bis alle Lösungen einem Rang zugeordnet sind. (Verma & Pant et al. 2021)

Die Lösung solcher Probleme mit mehreren Zielfunktionen ist abhängig von der sog. Zielbeziehung: Die verschiedenen Ziele können entweder komplementär, neutral oder konkurrierend zueinander sein. (Nickel & Rebennack et al. 2022) In der Produktion liegen häufig konkurrierende Ziele vor, d. h. eine höhere Zielerreichung des einen Ziels (z. B. Kostenminimierung) führt zu einer geringeren Zielerreichung eines anderen Ziels (z. B. Qualitätsmaximierung). In diesen Fällen ist eine Lösung zu bestimmen, die einen möglichst guten Kompromiss darstellt. Der sog. Zielerreichungsgrad Z_i eines Ziels i ist dabei definiert als $Z_i = \frac{F_i(x)}{z_i^*}$, wobei z_i^* den Optimalwert bei einkriterieller Optimierung nach dem Ziel i bezeichnet (Nickel & Rebennack et al. 2022). Ein zentrales Kriterium zur Bewertung der Güte einer Lösung eines **multikriteriellen Optimierungsproblems** stellt die **Pareto-Effizienz** dieser Lösung dar. Der Definition nach Nickel & Rebennack et al. (2022) folgt eingängig, dass eine Lösung genau dann pareto-optimal ist, wenn kein Zielkriterium weiter verbessert werden kann, ohne dass dadurch ein anderes Zielkriterium verschlechtert wird. In der Literatur existiert eine Vielzahl von Ansätzen zur Abbildung multikriterieller Probleme: Neben der lexikographischen Optimierung und der Optimierung bei Zieldominanz sind vor allem die Methode der Skalarisierung und das Goal Programming weit verbreitet und finden Anwendung in der vorliegenden Arbeit. Die **Methode der Skalarisierung** schlägt eine Kombination der einzelnen Zielfunktionen zu einer einzigen Ersatzzielfunktion vor. Dazu wird ein Gewichtungsvektor λ eingeführt, der jedem Zielkriterium i ein Gewicht zuordnet. Die Gewichte sind so zu wählen, dass $\sum_{i=1}^p \lambda_i = 1$ gilt. Die Ersatzzielfunktion ergibt sich damit zu $\tilde{F}(x) = \sum_{i=1}^p \lambda_i F_i(x)$. Beim **Goal Programming** wird für jedes Ziel eine Zielvorgabe definiert, die häufig dem optimalen Zielfunktionswert bei einkriterieller Optimierung entspricht. Es wird dann eine Lösung gesucht, die den Abstand der Lösung zu den Zielvorgaben minimiert. Welche Norm zur Bestimmung dieser Distanz verwendet wird, ist dabei nicht vorgegeben. Die Wahl der Norm wirkt sich jedoch unmittelbar auf die Komplexität des Problems aus. (Nickel & Rebennack et al. 2022)

2.1.3.3 Charakterisierung des (Robotic) Assembly Line Balancing Problems

Die in Kapitel 2.1.2 erwähnte Aufgabe der Ableitung einer betriebsmittelbezogenen Fügefolge lässt sich im mathematischen Sinne als **Zuordnungsproblem** von Prozessschritten (i. A. Aufgaben) zu Betriebsmitteln (i. A. Stationen) formulieren. In der Literatur existieren einige prominente Beispiele für Zuordnungsprobleme: Das Bin-Packing-Problem befasst sich mit der Bestimmung der kleinstmöglichen Anzahl gleich großer Behälter, die benötigt werden, um eine gegebene Menge n verschiedener Objekte zu verpacken (Grünert 2005). Weiter sucht das klassische Transportproblem die optimale Kombination von Transportwegen zwischen Angebot- und Nachfrageorten, um die anfallenden Transportkosten zu minimieren (Nickel & Rebennack et al. 2022). Es ergibt sich schließlich das **allgemeine, lineare Zuordnungsproblem**, das auch in der Produktion Anwendung findet: Hierbei sollen n Aufgaben m Stationen

zugeordnet werden. Die binäre Entscheidungsvariable $x_{ij} \in \{0, 1\}$ gibt an, ob Station i die Aufgabe j mit den Kosten c_{ij} zugeordnet wird ($x_{ij} = 1$). Die mathematische Formulierung zur Kostenminimierung ergibt sich nach Domschke & Drexl et al. (2015) gemäß:

$$\begin{array}{ll}
 \min & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \\
 \text{s.t.} & \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \text{für } i = 1, \dots, m \\
 & \sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad \text{für } j = 1, \dots, n
 \end{array}$$

Dieses einfache Problem kann als die Grundlage des mathematischen Problems bei der Ableitung von Fügefolgen gesehen werden. Das wird in der Literatur als *Assembly Line Balancing* (ALB) bezeichnet und im Folgenden genauer erörtert.

Allgemeines Assembly Line Balancing

Beim ALB geht es sowohl um die Konfiguration der Produktionslinie, also welche Stationen eingesetzt werden, als auch um die Zuordnung der einzelnen Prozessschritte (i. A. Aufgaben) zu den Stationen. Die zentrale Eigenschaft dabei ist, dass die Zuordnung durch die Vorrangbeziehungen zwischen den Aufgaben limitiert ist. Der Begriff *Line Balancing* betrachtet namentlich die Produktionslinie als industrielles Fertigungsprinzip (Wiendahl & Reichardt et al. 2014), da der Betrachtungsgegenstand des ALB die spezifische Neuplanung eines Produktionssystems ist. Dies findet immer dann statt, wenn die Produkte oder -varianten mit definierten Arbeitsschritten in besonders hohen Stückzahlen gefertigt werden. Im Gegensatz dazu findet die Werkstattfertigung Anwendung bei ungewissen, komplexen Materialflüssen und einer hohen Varianz, wie es z. B. bei einem Auftragsfertiger der Fall ist. Das in diesem Fall zugrundeliegende mathematische Problem wird als *Job Shop Scheduling* (JSS) bezeichnet und ist eng verwandt mit dem ALB. Salveson (1955) formuliert das *ALB Problem* (ALBP) erstmals im Jahr 1955. Heute stellt das als *Simple ALBP* (SALBP) bezeichnete Problem ein Basismodell dar, welches die in Abbildung 2.6 dargestellten Annahmen trifft.

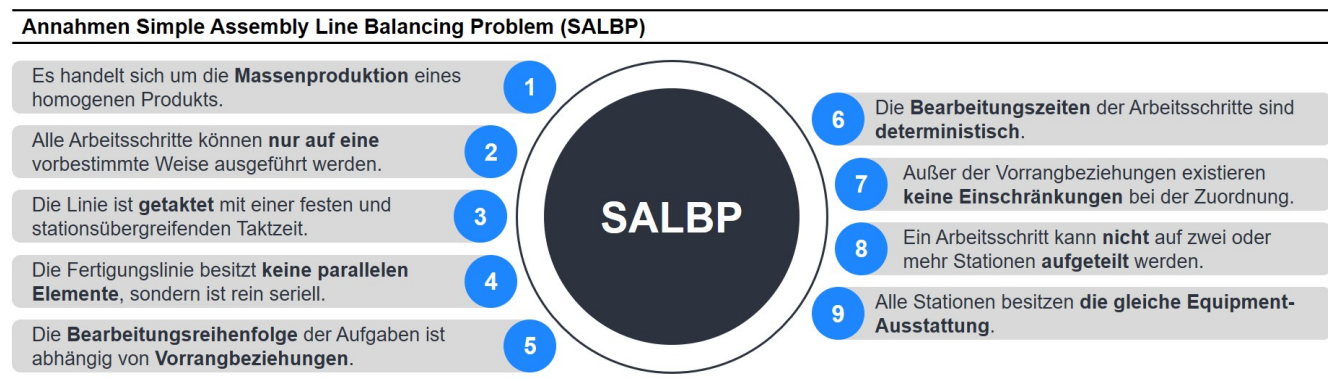


Abbildung 2.6: Annahmen des SALBP nach Boysen & Fliedner et al. (2007) (eigene Darstellung nach Schäfer & Tse et al. 2025).

Seit 1955 entwickeln sich aus diesem Basisproblem verschiedene Varianten. Boysen & Fliedner et al. (2007) führt 2007 eine Taxonomie zur Kategorisierung der Problemstellung ein. Je nach Anwendungsfall können die Anzahl der Stationen und die Taktzeit jeweils vorgegeben oder Gegenstand der Optimierung sein. Es ergeben sich die vier in Abbildung 2.7 dargestellten Kategorien, die mit I, II, F (von engl. *fixed*) und E (von engl. *efficiency*) bezeichnet werden.

Zuweisung von Fügeaufgaben zu Stationen ...				
Anzahl Stationen m		Taktzeit c		
		gegeben		zu minimieren
	gegeben	Kategorie SALBP-F: ... dabei sind Taktzeit als auch die Anzahl der Stationen Konstanten.	F	II Kategorie SALBP-II: ... mit dem Ziel, die Taktzeit zu minimieren.
	zu minimieren	Kategorie SALBP-I: ... bei gegebener Taktzeit mit dem Ziel, die Anzahl der Stationen zu minimieren.	I	E Kategorie SALBP-E: ... mit dem Ziel, die Anzahl der Stationen und die Taktzeit zu minimieren.

Abbildung 2.7: Kategorien des Simple Assembly Line Balancing Problems (SALBP) nach Boysen & Fliedner et al. (2007) (eigene Darstellung).

Robotic Assembly Line Balancing

Da die Annahme, dass alle Stationen gleich sind (Abbildung 2.6 Annahme 9), die Realität in der Produktionssystemplanung nicht hinreichend abbildet, befasst sich Rubinovitz & Bukchin et al. (1993) erstmalig mit der Modifikation des ALBP zum sog. *Robotic ALBP* (RALBP). Die wesentliche Erweiterung besteht darin, dass neben der Zuordnung von Aufgaben zu Stationen beim RALBP eine Auswahl des Equipments (z. B. Roboter) je Station durchzuführen ist. Die Equipment-Wahl wirkt sich dabei auf die Bearbeitungszeit der einzelnen Aufgaben aus. Diese ist somit zwar deterministisch (Abbildung 2.6 Annahme 6), jedoch nun equipmentabhängig. Damit kombiniert das RALBP zwei Subprobleme, die sich gegenseitig bedingen und damit gleichzeitig zu optimieren sind (Chutima 2022). Nach Chutima (2022) ergeben sich analog zu den Annahmen des SALBP für das RALBP die in Abbildung 2.8 dargestellten Annahmen.

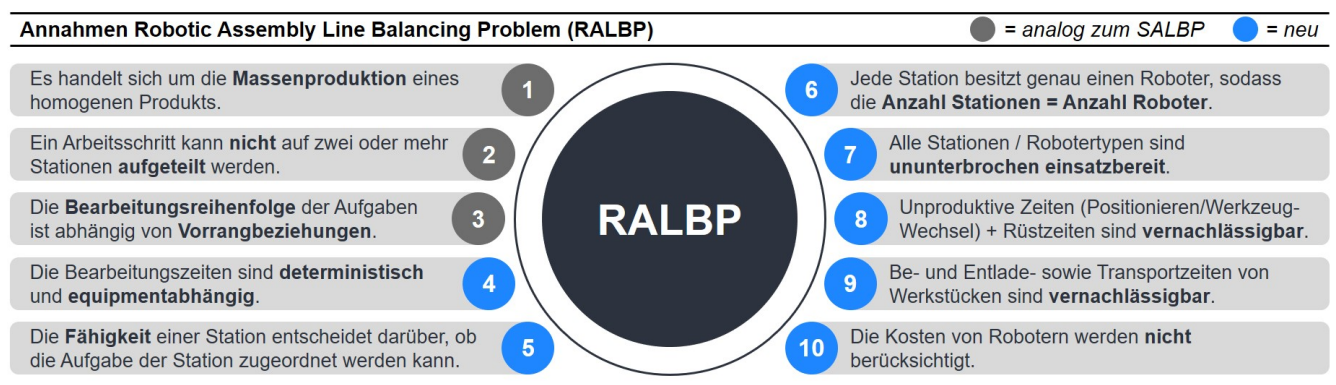


Abbildung 2.8: Annahmen des RALBP nach Chutima (2022) (eigene Darstellung nach Schäfer & Tse et al. 2025).

Auch diese Annahmen stellen eine Abstraktion der Realität dar, wenngleich das RALBP äußerst komplex ist. Mathematisch betrachtet ist das RALBP im Allgemeinen wie auch das ALBP NP -schwer. Die Komplexität hängt neben Faktoren wie bspw. der Anzahl verschiedener Stationstypen, deren Fähigkeitsbreite, der Struktur des Vorranggraphen oder der Zykluszeit vor allem von der Anzahl an Arbeitsschritten n und der Anzahl an Vorrangbeziehungen p ab und kann nach Chutima (2022) als $\frac{n!}{2^p}$ angegeben werden. Abhängig vom Layout und den in Chutima (2022) eingeführten 4M-Klassifikationskriterien (*Man*, *Machine*, *Material* und *Method*) ergeben sich die in Tabelle 2.1 dargestellten Varianten des RALBP.

Tabelle 2.1: Varianten des Robotic Assembly Line Balancing Problems nach Chutima (2022).

	Dimension	Beschreibung
Layout	<i>Multi-manned</i>	Mehrere Roboter bzw. Arbeitskräfte pro Station
	Parallele Stationen	Identische und parallel angeordnete Stationen
	Parallele Linien	Identische und parallel angeordnete Linien
	U-förmig	Fertigungslinie besitzt die Form eines U
	I-förmig	Fertigungslinie verläuft geradlinig
	Zweiseitig	Bearbeitung der Produkte beidseitig möglich
	Hybrid	Mischform aus verschiedenen Layouts
Man	Automatisierungsgrad	Teil-/vollautomatisierte Linie
	Ergonomie	Berücksichtigung ergonomischer Aspekte
	Lerneffekte	Berücksichtigung von Lerneffekten bei Arbeitskräften
Machine	Hardware	Handling der Teile, Befestigung etc.
	Software	Werkzeugwechsel, Belade-/Entladeoperationen etc.
Material	Produktvarianten	Eine Variante vs. mehrere mit beliebiger Sequenz
	Bearbeitungszeit	Deterministisch vs. stochastisch, equipmentabhängig
	Zuordenbarkeit	<i>Positive zoning</i> : umfasst Bearbeitungsschritte, die auf derselben Station zu bearbeiten sind. <i>Negative zoning</i> : umfasst Bearbeitungsschritte, die nicht auf derselben Station bearbeitet werden dürfen.
Method	SALBP-Kategorie	Typen I , II , E , F (siehe Abbildung 2.7), Cost , Others
	Anzahl Ziele	Einkriteriell vs. multikriteriell
	Problemklasse	z. B. MILP, Non-Linear Programming etc.
	Lösungsverfahren	Exaktes Verfahren, Heuristik, Metaheuristik
	Verknüpfung	z. B. simultane Optimierung der Fertigungssequenz

Zuletzt sei an dieser Stelle noch auf besondere Herausforderungen des RALB beim **Fügen durch Schweißen** hingewiesen: So ist dabei z. B. die Erreichbarkeit der Schweißverbindung durch den Roboter und das Verhältnis der Bearbeitungszeit zur unproduktiven Zeit (bspw. Handling oder Positionieren) von Interesse. Darüber hinaus sind meist mehrere Roboter pro Station vorhanden, die sich gegenseitig behindern könnten. (Lopes & Sikora et al. 2017) Für diese Forschungsarbeit besonders relevant ist, dass beim Schweißen Annahme 2 aus

Abbildung 2.8 verletzt wird, d. h. eine Schweißverbindung bzgl. ihrer Gesamtlänge aufgeteilt und somit bei der Zuordnung auf mehrere Stationen verteilt werden kann. Mit Bezug auf die Entscheidungsvariable des RALBP führt dies zu einer **nicht-diskreten Zuordnung von Aufgaben zu Stationen**.

Neben den vorliegenden Produktinformationen, welche die Grundlage für die Festlegung der notwendigen Produktionsprozesse und die Zuweisung zu Stationen darstellt, ist eine standardisierte Abbildung von Produkt, Prozess und Produktion sowie deren Wechselwirkungen in Form von digitalen Modellen von zentraler Bedeutung. Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel 2.2 auf die relevanten, theoretischen Grundlagen der Modellierung eingegangen.

2.2 Modellierung

Dieses Kapitel thematisiert die methodischen Grundlagen der Modellierung. Der Begriff *Modellierung* steht im Allgemeinen für den generellen Prozess der abstrakten Erstellung eines Modells (Westkämper 2013), sodass die Aktivitäten der Modellierung sowie die Art und die Eigenschaften des Modells von dem spezifischen Kontext der Modellierung abhängen. Für diese Forschungsarbeit ist der Einsatz spezifischer Modelle im Produkt-Produktions-Kontext relevant. Die folgenden Kapitel widmen sich daher der Beschreibung des PPR-Modells (Kapitel 2.2.1), der Methoden des sog. *Model-Based Systems Engineering* (MBSE) (Kapitel 2.2.2), der datengetriebenen Modellierung (Kapitel 2.2.3) und der Simulation (Kapitel 2.2.4) und ordnen diese relevanten Konzepte in den Gesamtkontext der Arbeit ein.

2.2.1 Das PPR-Modell

Die Diskussion der hier betrachteten Aufgabe der Produktionssystemplanung im vorausgehenden Kapitel 2.1 zeigt anschaulich, dass hierbei Informationen über Produkt, Prozess und Produktionssystem benötigt und erzeugt werden. Das in Abbildung 2.9 links visualisierte PPR¹ (**P**rodukt, **P**rozess und **R**essource bzw. Produktionssystem) Modell nach Feldmann & Schmuck et al. (2008) ist ein theoretisches Informationsmodell mit dem Ziel der Abbildung einer Datendurchgängigkeit von der Produktentwicklung über die Produktionssystemplanung bis hin zum operativen Betrieb der Produktion (Hagemann 2022). Die Umsetzung dieses Grundgedanken befähigt Unternehmen zu einem durchgängigen, digitalen Engineering. Alle anfallenden Daten und Informationen müssen hierfür in digitalen Produkt-, Prozess- und Produktionssystemmodellen gespeichert und verfügbar gemacht werden. Für die angestrebte Datendurchgängigkeit ist jedoch zusätzlich eine **durchgängige Referenzierung** der Modelle erforderlich. In der industriellen Praxis früher Planungsphasen stellt das Unternehmen vor

¹ In der Definition nach Feldmann & Schmuck et al. (2008) steht PPR für Produkt (abgebildet durch das Produktmodell), Prozess (abgebildet durch das Prozessmodell) und Ressource (abgebildet durch das Produktionssystemmodell).

große Herausforderungen, weshalb der industrielle Umsetzungsgrad des PPR-Modells heute nur eine **unregelmäßige Referenzierung** umfasst (siehe Abbildung 2.9 rechts) (Hagemann & Sünnetcioglu et al. 2019). Ein Grund dafür ist die Heterogenität der vorliegenden Daten, welche in verschiedenen Modellen enthalten sind. Im Folgenden wird daher auf heute gängige Produkt-, Prozess- und Produktionssystemmodelle eingegangen.

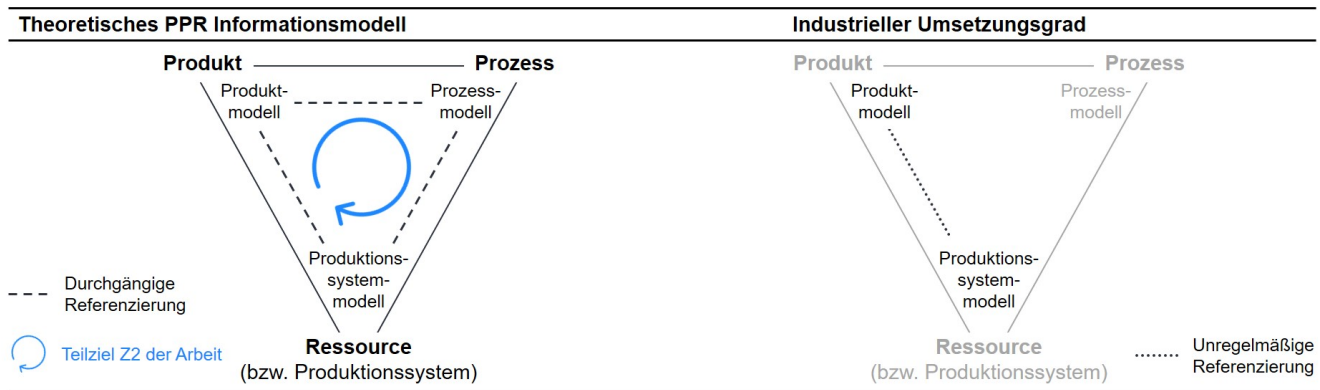


Abbildung 2.9: Das PPR-Modell nach Feldmann & Schmuck et al. (2008) (eigene Darstellung in Anlehnung an Hagemann & Sünnetcioglu et al. 2019).

Produktmodelle

Grundlage für die vorliegende Aufgabe der Produktionssystemplanung sind in der industriellen Praxis vorrangig **CAD-Modelle** und **Stücklisten**. Bei letzteren kann, wie in Kapitel 2.1.2 bereits eingeführt, zwischen Produkt- (EBOM) und Fügestruktur (MBOM) unterschieden werden. CAD-Systeme eignen sich besonders zur 3D-Produktmodellierung und -visualisierung (Ehrlenspiel 2014). Dabei basiert die 3D-Form eines Bauteils auf einfachen geometrischen Grundelementen. Neben der *Constructive Solid Geometry* (CSG) und der *Boundary-Representation* (B-Rep) Modellierung ist die Feature-Modellierung eine in der Praxis gängige Möglichkeit zur Erzeugung von 3D-Objekten. Unter einem Feature (im Deutschen oft auch als Merkmal bezeichnet) werden produktgestaltende Elemente wie bspw. eine Bohrung oder Fase verstanden. Diese Konstruktionselemente bilden schließlich den Strukturbaum eines Produkts, der bei einer Baugruppe neben einer reinen Konstruktionsstückliste über die Features auch die Konstruktionshistorie enthält. (Hackenschmidt & Hautsch et al. 2020) Zur Verarbeitung von CAD-Modellen haben sich neben der Festkörper- und Feature-basierten Repräsentation vor allem Oberflächenrepräsentationen (z. B. STL oder Meshes) und Punktwolken etabliert (Gezawa & Zhang et al. 2020). Eine Punktwolke kann dabei als Menge unstrukturierter Punkte jeweils repräsentiert durch drei Raumkoordinaten angesehen werden, mit der die 3D-Geometrie des Objekts angenähert wird (Ahmed & Saint et al. 2018). Neben CAD-Modellen und Stücklisten werden in der Variantenfertigung Produktstrukturen als **Merkmalbaum** (Schuh & Riesener 2017) oder **morphologischer Kasten**

(Ponn & Lindemann 2011) repräsentiert. Diese ermöglichen eine einfache Konfiguration der spezifischen Produktvariante abhängig von der jeweiligen Kombination und Ausprägung der definierten Merkmale. Zur Trennung von funktionaler und physischer Produktgestalt haben sich **Produktarchitekturen** (Göpfert 1998; Rudolf 2013) und **Baukastensysteme** (Bursac 2016) etabliert. Modulare Produktarchitekturen ordnen dabei jedem physischen Modul eine spezifische Funktion zu. Ein Produktbaukasten enthält ein Regelwerk zur Konfiguration von Produkten d. h. der Auswahl und Kombination von Bausteinen und umfasst die Gesamtmenge aller technischen Subsysteme, die diesem Regelwerk folgen (Bursac 2016). Abbildung 2.10 visualisiert die beschriebenen Produktmodelle.

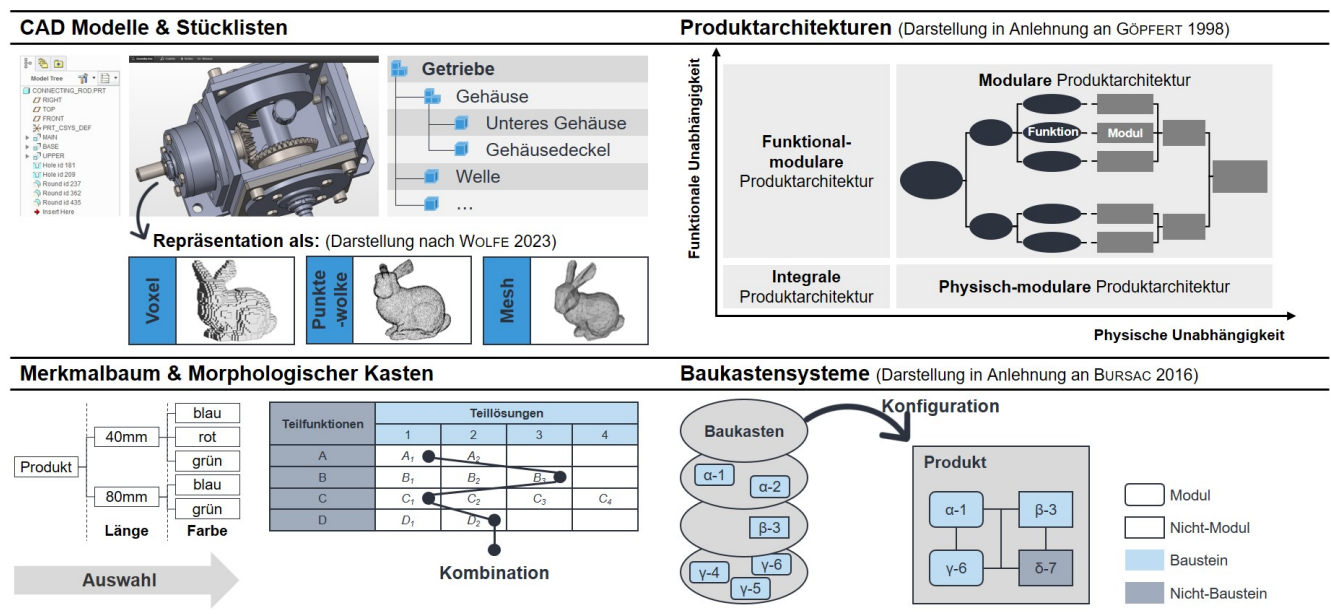


Abbildung 2.10: Eine Auswahl verschiedener, gängiger Produktmodelle (eigene Darstellung).

Prozessmodelle

Für den Kontext der vorliegenden Forschungsarbeit ist bei der Prozessmodellierung vor allem die Abbildung der Abhängigkeits- bzw. Abfolgerestriktionen (i. A. Vorrangbeziehungen) zwischen einzelnen Prozessschritten relevant. In der Praxis haben sich hierfür sog. **(Prozess-) Vorranggraphen** etabliert (Prenting & Battaglin 1964). Die Visualisierung aus Knoten (Prozessschritte) und Kanten (Vorrangbeziehungen) erlaubt Verzweigungen und Zusammenführungen, wie Abbildung 2.11 zeigt. Die Schritte werden zum Zeitpunkt der frühestmöglichen Ausführbarkeit eingetragen und das Ende der von einem Knoten ausgehenden Kante entspricht dem spätestmöglichen Verrichtungszeitpunkt. (Bullinger 1986) Eine alternative Darstellung derselben Abhängigkeitsrestriktionen ermöglicht die **Vorrangmatrix**, welche die vorliegenden Vorrangbeziehungen binär als 0 (zwischen n -ter Zeile und m -ter Spalte liegt keine Vorrangbeziehung vor) oder 1 (n ist Vorgänger von m) codiert. Symmetrische Matrizen geben als -1 zudem an, wenn n Nachfolger von m ist.

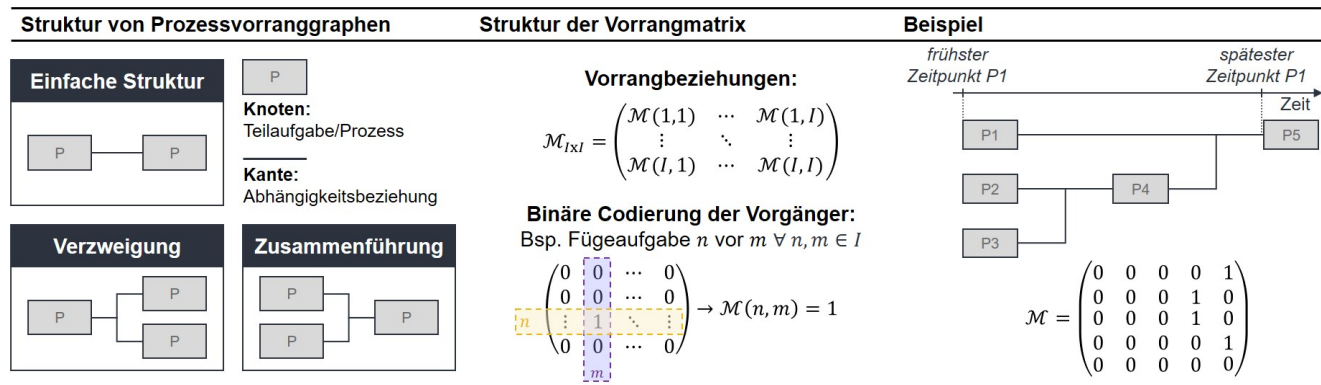


Abbildung 2.11: Strukturen zur Darstellung von Abfolgerestriktionen in Vorranggraphen und -matrizen (eigene Darstellung in Anlehnung an Muckenhirn 2005) und Beispiel für einen Vorranggraphen und dessen zugehörige Vorrangmatrix (eigene Darstellung in Anlehnung Schuh & Prote et al. 2019).

Produktionssystemmodelle

Ähnlich wie CAD-Systeme in der Produktentwicklung ist eines der meistverwendeten digitalen Werkzeuge zur Modellierung von Produktionsabläufen die **Simulation**. Auf Möglichkeiten der Simulation von Produktionssystemen wird in Kapitel 2.2.4 eingegangen. Zur Modellierung, Strukturierung und Bereitstellung von Produktionswissen eignen sich sog. **Ontologien** (Terkaj & Urgo 2014). Der Begriff *Ontologie* wird in der Literatur unterschiedlich verwendet. Nach Gruber (1995) beschreibt eine Ontologie im Allgemeinen einen Wissensbereich mit einer standardisierten Terminologie inklusive definierter Relationen zwischen den aufgeführten Begriffen. Für das Verständnis im Rahmen der vorliegenden Arbeit kann eine Ontologie mit einem Klassendiagramm aus der objektorientierten Programmierung verglichen werden. Inzwischen gibt es zahlreiche Ansätze zur Implementierung einer Ontologie für die Produktionsplanung (siehe z. B. Cadet & Sinnwell et al. 2017). Die Domäne ist dabei jedoch nicht ausschließlich auf die Produktion zu begrenzen. So sind Ontologien ein Schlüssel in der zuvor erwähnten, durchgängigen Vernetzung zwischen Produkt-, Prozess- und Produktionssystemmodellen. Dies ist ein zentraler Aspekt des Model-Based Systems Engineering und wird im folgenden Kapitel 2.2.2 ausgeführt.

2.2.2 Model-Based Systems Engineering (MBSE)

Die zuvor beschriebenen Modelle dienen der Beschreibung des jeweils betrachteten, zu entwickelnden Systems. Sollen diese Systeme nun im Sinne der Datendurchgängigkeit zu einem PPR-Gesamtsystem kombiniert werden, so steigt die Systemkomplexität und es ist ein domänenübergreifender Austausch erforderlich. Das sog. *Systems Engineering* (SE) behandelt diese durchgängige und fachdisziplinübergreifende Entwicklung komplexer technischer Systeme (Haberfellner & Weck et al. 2019). Das modellbasierte Systems Engineering

(engl. *Model-Based Systems Engineering* (MBSE)) ist ein zentrales Paradigma des SE, das sich aus der Entwicklung mechatronischer Systeme heraus etabliert hat. Beim MBSE wird das zu entwickelnde System durchgängig, fachdisziplinübergreifend und über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg in einem formalen Systemmodell abgebildet (Anacker 2015). Zur Beschreibung von Terminologie und Relationen dieses Systemmodells eignet sich die zuvor eingeführte Ontologie (vgl. Klassendiagramm). Das Systemmodell im Sinne des MBSE ersetzt dabei nicht die in den beteiligten Domänen etablierten Softwaretools und Modelle. Vielmehr werden fachdisziplinübergreifende Informationen auf domänenübergreifender Ebene (vgl. *Esperanto*) mit geeigneten, formalen Diagrammen dargestellt, sodass diese computergestützt automatisch verarbeitet werden können (Kaiser 2023). Dieses **modellbasierte Vorgehen** stellt einen klaren Vorteil gegenüber dem klassischen, **dokumentbasierten Vorgehen** (z. B. Austaktung in Excel, Layouts in PowerPoint etc.) dar und ermöglicht die durchgängige Verknüpfung zwischen Produkt, Prozess und Produktionssystem. Die Beschreibung eines solchen interdisziplinären Modells besteht nach Delligatti (2014) neben dem Systemmodell selbst aus dem in Abbildung 2.12 dargestellten Tripel Sprache, Methode und Werkzeug.

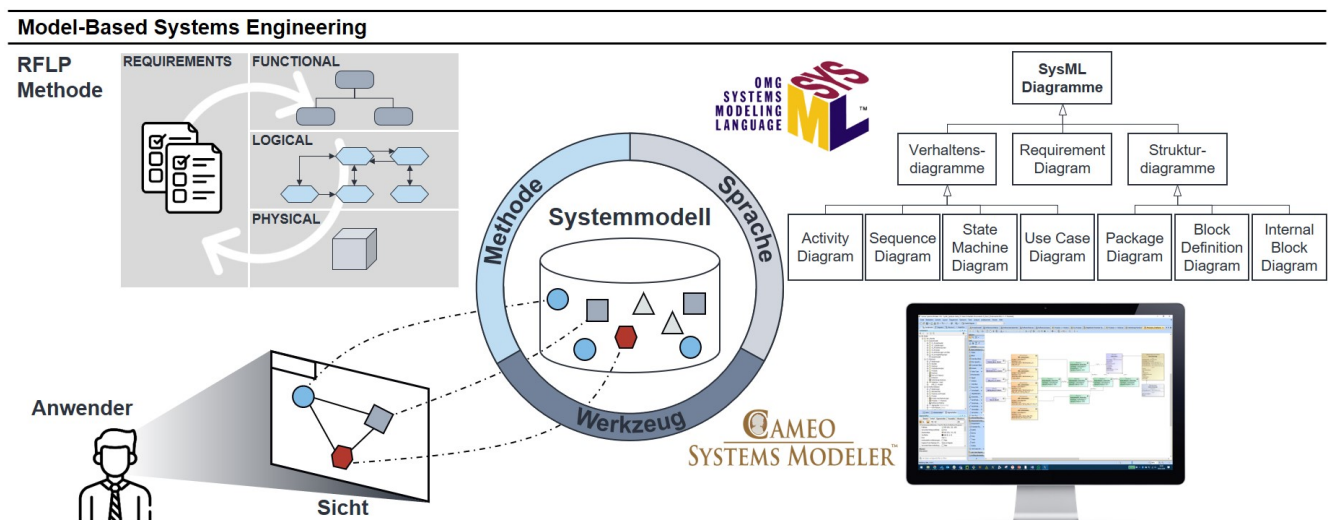


Abbildung 2.12: Die Bestandteile eines Systemmodells im Sinne des Model-Based Systems Engineering (eigene Darstellung in Anlehnung an Delligatti 2014).

Die **Sprache** dient als Ausdrucksmittel, sodass die beteiligten Fachdisziplinen trotz unterschiedlichem Wissensstand das domänenübergreifende Systemmodell verstehen und verwenden können. Sie ist die Grundlage für die Modellierung und besteht wie jede formale Sprache aus einer Syntax (Zeichen bzw. Symbole) und einer Semantik (Bedeutung der Zeichen). (Kaiser 2023) Der im *International Council on Systems Engineering* (INCOSE) gängigste Sprachstandard ist das UML (*Unified Modeling Language*) Derivat *Systems Modeling Language* (SysML). Die **SysML** ist eine grafische Modellierungssprache und umfasst die Standard-Diagrammtypen, die Abbildung 2.12 entnommen werden können (OMG 2017).

Durch die **Methode** wird definiert, wie und zu welchem Zweck die Sprache angewandt werden soll. Dadurch wird spezifiziert, welche Informationen in welcher Reihenfolge abgebildet werden und wie das Ergebnis der Modellierung aussehen soll (Delligatti 2014). Ein Beispiel ist die Modellierung nach dem **RFLP** (*Requirements, Functional, Logical, Physical*) Prinzip, welches von Mejía-Gutiérrez & Carvajal-Arango (2017) auch in das V-Modell (VDI 2206) integriert wird. Die RFLP-Methode schlägt eine Strukturierung des Systemmodells in Anforderungen und eine funktionale, logische und physische Ebene vor (Kleiner & Kramer 2013).

Schließlich kann mithilfe eines **Werkzeugs** (z. B. Dassault Systems **Cameo Systems Modeler**¹) die Modellierung software-technisch umgesetzt und Modellelemente und deren Zusammenhänge abgebildet werden. Der Anwender kann so gemäß der Methode in dem Software-Werkzeug mithilfe der formalen Sprache Modellelemente handhaben und das Systemmodell erstellen (Delligatti 2014).

Bei komplexen Systemen ist es üblich das **Systemmodell** aus mehreren Modellen zusammenzusetzen. Dem Anwender werden diese Teilmodelle als sog. Sichten zur Verfügung gestellt. Das Gesamtmodell wird als Modellrepository zur ganzheitlichen Verknüpfung im Hintergrund gespeichert. In den jeweiligen Sichten modifiziert der Anwender jedoch immer das Gesamtsystemmodell selbst (vgl. Prinzip der *single source of truth*). So wird eine konsistente Modellierung sichergestellt. (Delligatti 2014) Die Modellierungssprache SysML setzt dieses Grundprinzip um und bezeichnet die verschiedenen Sichten als Diagramme (Alt 2012). Diese Eigenschaft des MBSE ist bei der disziplinübergreifenden Modellierung von Zusammenhängen zwischen Produkt, Prozess und Produktionssystem in PPR-Systemen von großem Vorteil. Diese Modellierung der Zusammenhänge erzeugt jedoch sehr schnell einen hohen manuellen Aufwand, weshalb im folgenden Kapitel 2.2.3 auf Ansätze zur datengetriebenen Modellierung d. h. der Identifikation solcher Zusammenhänge in Daten eingegangen wird.

2.2.3 Datengetriebene Modellierung

Für die Produktionssystemplanung sind besonders die Auswirkungen verschiedener Produkteigenschaften auf den Planungsentwurf relevant. Hierbei ist die industrielle Planung kostengetrieben. Einen großen Einfluss darauf haben die Planzeiten d. h. der Zusammenhang zwischen Produkteigenschaften (bspw. bestimmten Features) und den Planzeiten zur Herstellung des Produkts. Heute werden diese Zusammenhänge meist manuell ermittelt und festgehalten und sind oft Gegenstand personengebundenen Planungswissens. Ein Beispiel dafür ist die Abhängigkeit der Planzeit für das Schweißen von der Länge der Schweißverbindung, der Geschwindigkeit des Schweißroboters und weiteren Faktoren wie z. B. dem Handling oder Rüsten. Im Allgemeinen werden hierfür Standards wie die analytische

¹ <https://www.3ds.com/products/catia/no-magic/cameo-systems-modeler> (besucht am: 01.10.2024)

Planzeitermittlung nach REFA oder die synthetische Planzeitermittlung nach *Methods-Time Measurement* (MTM) verwendet (Wiendahl & Denner 2020), deren Eignung vom Fokus der Ablaufschritte abhängt (siehe Abbildung 2.13). Zentrale Nachteile der Verfahren sind der **hohe manuelle Aufwand**, die mangelnde Generalisierbarkeit und die Abhängigkeit von standardisierten Arbeitsschritten (Westkämper 2006; Schlick & Bruder et al. 2010).

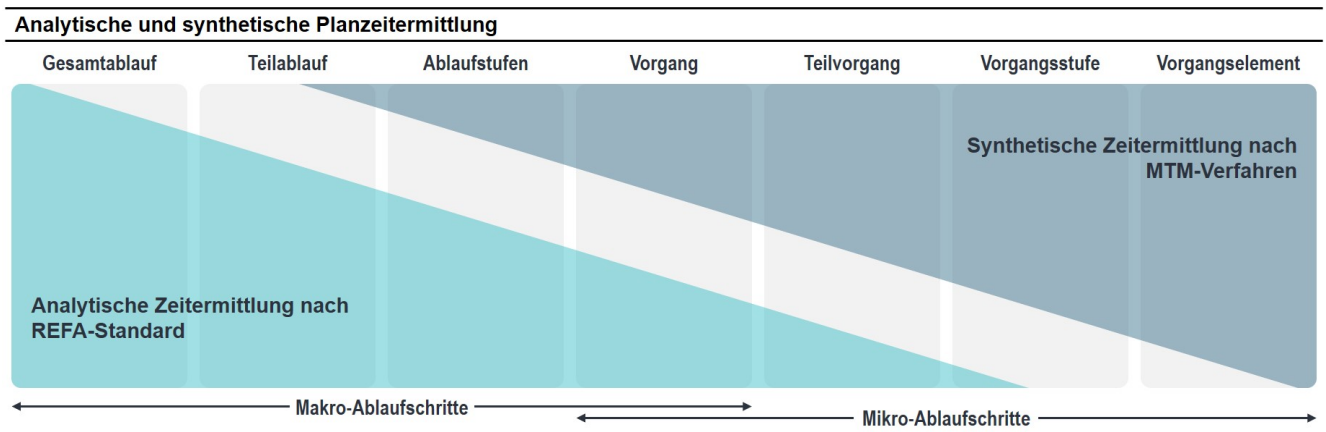


Abbildung 2.13: Eignung der Verfahren nach REFA und MTM (eigene Darstellung in Anlehnung an Leininger 2022).

Liegen jedoch historische Daten in ausreichender Qualität und Menge vor, so eignen sich Verfahren des **Data Mining** zur Identifikation von Mustern und Zusammenhängen in Daten. Data Mining bezeichnet damit den Prozess neue Informationen und Wissen aus Daten zu extrahieren (Fayyad & Piatetsky-Shapiro et al. 1996). Rogalewicz & Sika (2016) unterscheidet hierzu fünf zentrale Verfahren des Data Mining, die in Abbildung 2.14 dargestellt sind.

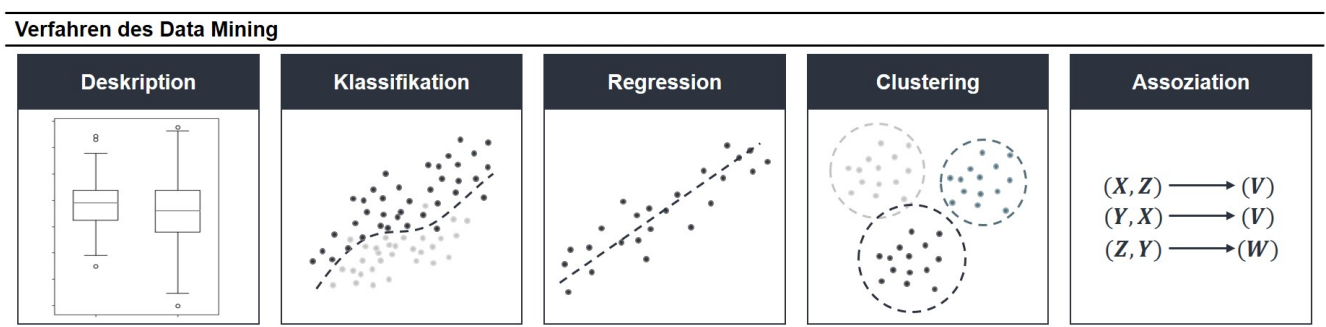


Abbildung 2.14: Verfahren des Data Mining (eigene Darstellung).

Als weiteres und vergleichsweise neues Verfahren an der Schnittstelle zum Data Mining etabliert sich aktuell das **Process Mining** im Umfeld der industriellen Produktion. Process Mining kommt aus der Analyse von Geschäftsprozessen und nutzt Event-Logs (i. A. Log-Daten), die ein Objekt beim Durchlaufen eines Systems hinterlässt. Durch die Analyse der Log-Daten bspw. eines Produktionsauftrags können automatisiert mögliche Prozessmodelle erstellt werden (sog. *Process Discovery*). (van der Aalst 2016) Werden nun die Eigenschaften

der Produktionsaufträge d. h. der Produkte mit den Zeitstempeln bzw. -differenzen bei den Bearbeitungsschritten verknüpft, können so **datengetrieben** Zusammenhänge zwischen Produkt, Prozess und Produktionssystem ermittelt werden. Process Mining wird in der Produktion häufig auch zur Verbesserung von Simulationsmodellen (vgl. *Real2Sim*) eingesetzt. Auf diese wird im folgenden Kapitel 2.2.4 kurz eingegangen.

2.2.4 Modellierung und Simulation

Unter dem Begriff *Simulation* versteht man im Allgemeinen eine Problemlösungsmethode, die dazu dient, Aussagen über das Verhalten realer, durch Modelle abgebildeter Systeme zu treffen (Gutenschwager & Rabe et al. 2017). Im Umfeld von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen ist die Simulation nach VDI 3633 definiert als das „Nachbilden eines realen Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI 3633 2014). Das zu erzeugende Simulationsmodell lässt sich hierbei anhand seiner spezifischen Eigenschaften charakterisieren: Im Allgemeinen wird unterschieden zwischen statischem und dynamischen Zeitverhalten, deterministischen oder stochastischen Zufallsverhalten und diskreter oder kontinuierlicher Zeit- und Zustandsmenge (Gutenschwager & Rabe et al. 2017). In der Produktionssystemplanung wie auch in der vorliegenden Arbeit kommen vermehrt sog. **ereignisdiskrete Simulationsmodelle** zum Einsatz. Diese sind diskret, dynamisch, stochastisch und nicht terminierend. Hierbei geht es primär um die Systementwicklung im Zeitverlauf, wobei Zustandsvariablen sich nur zu einzelnen, diskreten Zeitpunkten verändern (Law 2015). Um den Aufwand der Modellierung überschaubar zu halten, eignet sich eine Modularisierung des Simulationsmodells (Kern 2021). Hierbei ist die Wahl der Modellierungstiefe von entscheidender Bedeutung. Tabelle 2.2 zeigt dafür einen erweiterten morphologischen Kasten nach Henkenjohann & Joppen et al. (2021) inklusive Merkmalen zur Beeinflussung des Detaillierungsgrads eines Simulationsmodells.

Abhängig von der gewählten Modellierungstiefe eignen sich unterschiedliche **Spezifikations-techniken** für die Modellformalisierung. Beispiele dafür sind die *Unified Modeling Language* (UML), die *CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems* (CONSENS) nach Gausemeier & Brandis et al. (2012) oder die *Graphe de Commande Etape/Transition* (GRAFCET), welche die Modellierung komplexer Abläufe ermöglichen. Bei letzterer können Teilabläufe durch das Zusammenfassen mehrerer Schritte und Transitionen in nur einem Schritt modularisiert werden (Merhof 2015). Weiter existieren zur formalen Implementierung des Modells verschiedene **Simulationswerkzeuge**, die jeweils einen unterschiedlichen Fokus hinsichtlich der Merkmale aus Tabelle 2.2 haben. Bei der Wahl des Simulationswerkzeuges gilt es abhängig vom Zweck und dem Detaillierungsgrad einen geeigneten Kompromiss zwischen Implementierungsaufwand, Einfachheit, Erweiterbarkeit und

Tabelle 2.2: Morphologischer Kasten zur Wahl der Modellierungstiefe.

Wahl der Modellierungstiefe					Wahl in Kapitel 4.4 bzw. 5.4.1 fett markiert
Bezugssystem	Reales System			Idealität	
Ebene	Komponente	Zelle	Produktions- linie	Fabrik	Netzwerk
Systemgrenze	Idealisiert		Vereinfacht abgebildet		Detailliert abgebildet
Materialebene	Produktebene		Baugruppenebene		Bauteilebene
Interoperabilität	Standalone	Bidirektional	Unidirektional	Manuell verknüpft	Nicht integriert
Wertschöpfung	Ein Prozess	Wesentliche Schritte		Aktorbewegungen	Detaillierte Abläufe
Ablaufstruktur	Ohne Steuerung		Annäherung Steuerungslogik		Abbildung Steuerungslogik
Visualisierung	Visuell abstrakt		Visuell grob		Visuell detailliert
Raumdimension	1D		2D		3D

Ausführungszeit zu finden (Wenzel & Weiß et al. 2008). Für Ablaufsimulationen, die einen Fokus auf die quantitative Analyse bspw. einer Ausbringung des Systems abhängig von zu variierenden Parametern legen, eignen sich Tools wie **AnyLogic**¹. Diese ermöglichen eine einfache, parametrische Abstraktion der Ressourcen. Aufgrund der Echtzeitfähigkeit und Standard-Schnittstellen haben sich in der Produktionssteuerung Python Frameworks wie z. B. SimPy etabliert. Durch die Entwicklungen im Rahmen des digitalen Zwillings werden zudem 3D-Simulationsmodelle wie z. B. **Visual Components**² immer interessanter. Für die industrielle Produktionssystemplanung wird es dabei immer wichtiger während der Planung bereits digitale Modelle zu erzeugen, die in weiteren Planungsphasen und der Produktion genutzt werden können. Abbildung 2.15 visualisiert diesen Gedanken und definiert die Abgrenzung der Begriffe *digitales Modell*, *digitaler Schatten* und *digitaler Zwilling* nach Grieves & Vickers (2017).

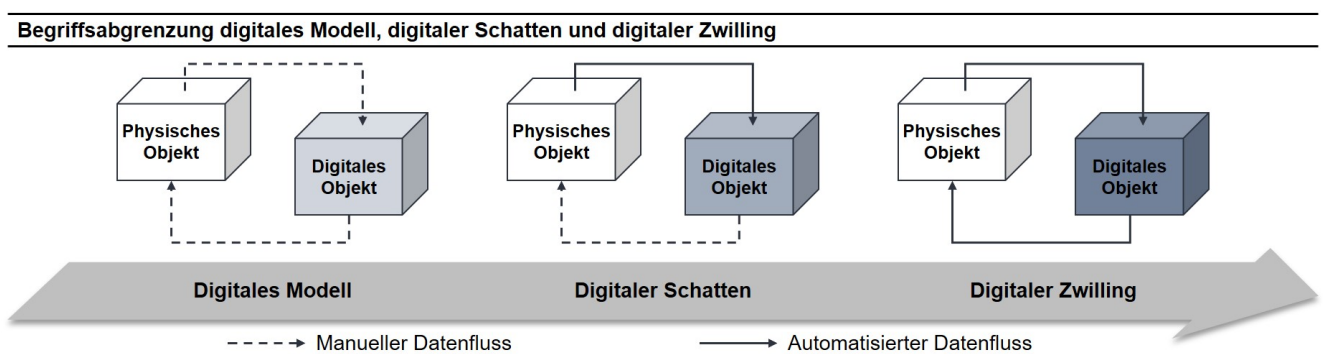


Abbildung 2.15: Entstehung eines digitalen Zwillings aus der Produktionssystemplanung heraus (eigene Darstellung in Anlehnung an Grieves & Vickers 2017).

¹ <https://www.anylogic.com/> (besucht am: 01.10.2024)

² <https://www.visualcomponents.com/> (besucht am: 01.10.2024)

2.3 Zwischenfazit und Darlegung des Forschungsgegenstands

Dieses Kapitel 2 behandelt die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit relevanten Grundlagen und ordnet die betrachtete Aufgabe der Produktionssystemplanung und die dabei eingesetzten Methoden in den Gesamtkontext der Produktionsplanung ein. Dabei wird der Fokus dieser Forschungsarbeit auf die **assistierte Produktionssystemplanung** d. h. die produkt- bzw. variantenspezifische Neuplanung eines Produktionssystems herausgearbeitet. Konkret umfasst die betrachtete Planungsaufgabe die ideale Grobplanung eines Produktionssystems auf Basis vorliegender Produktinformationen. Die **Analyse der Produktdaten** beschreibt dabei den ersten Schritt der assistierten Produktionssystemplanung. Dem Planer stehen durch die Kundenanfrage zum Zeitpunkt der Grobplanung erste CAD-Daten, Stücklisten und Auftragsdetails zur Verfügung. Um in einem zweiten Schritt die notwendigen Prozessschritte und deren Abfolgerestriktionen zu identifizieren, ist eine **modellbasierte Verknüpfung von Produkt, Prozess und Produktionssystem** (Ressource) im Sinne des PPR-Prinzips erforderlich. Diese durchgängige, fachdisziplinübergreifende Modellierung ist ein zentrales Paradigma des *Model-Based Systems Engineering* (MBSE). Um basierend auf dem betriebsmittelunabhängigen Prozessvorranggraphen eine betriebsmittelbezogene Produktionsfolge abzuleiten, ist eine **multikriterielle Optimierung** der Zuordnung von Prozessschritten (i. A. Aufgaben) zu Stationen notwendig. Dieser dritte Schritt wird in der Literatur als (Assembly) Line Balancing bezeichnet. Der letzte Planungsschritt betrachtet die **Erzeugung modularer, digitaler (Simulations-) Modelle**, die in nachfolgenden Phasen der Planung (z. B. zur Detail-Layoutplanung) bis hin zum Betrieb des realen Produktionssystems (z. B. als digitaler Zwilling) genutzt werden können. Im folgenden Kapitel wird auf den aktuellen Stand der Forschung in der **assistierten Produktionsplanung** und den beschriebenen **vier Teildisziplinen** des vorliegenden Forschungsgegenstands eingegangen.

3 Stand der Forschung

In diesem Kapitel 3 wird im Bezug auf den zuvor dargelegten Forschungsgegenstand der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik aufgezeigt. Ziel des Kapitels ist es, den Stand der Forschung gegen die im ersten Abschnitt 3.1 definierten Bewertungskriterien abzugleichen und das resultierende Forschungsdefizit zu spezifizieren. Die **Kriterien zur Bewertung und Charakterisierung** der Literatur ergeben sich aus den Anforderungen an den Lösungsansatz zur assistierten Produktionssystemplanung. Neben einem **Überblick über die bestehenden Ansätze** zur ganzheitlichen, assistierten Produktionssystemplanung (3.2.1) wird auf ausgewählte Ansätze in der **Literatur der enthaltenen Teildomänen** eingegangen: Konkret handelt es sich um Ansätze zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten (3.2.2), Ansätze zur modellbasierten Verknüpfung von Produkt und Produktion (3.2.3), Ansätze zur Optimierung von Produktionssystemen (3.2.4) und Ansätze zur modularen Visualisierung und Simulation von Produktionssystemen (3.2.5). Die im Rahmen der Bewertung des Forschungsstands gewonnenen Erkenntnisse erlauben schließlich die Ableitung der **Forschungslücke** in Abschnitt 3.3. Dieser Abschnitt 3.3 bildet den Abschluss des Kapitels und definiert zudem die **forschungsleitenden Fragen**, die mit dem eigenen Ansatz im nachfolgenden Kapitel 4 beantwortet werden sollen.

3.1 Kriterien zur Bewertung des Stands der Forschung

Bewertungskriterien für Ansätze zur assistierten Produktionssystemplanung

Die Kriterien zur Bewertung von Ansätzen zur assistierten Produktionssystemplanung werden im Bezug auf den Scope der hier betrachteten Grobplanung (Abbildung 3.1) hergeleitet.

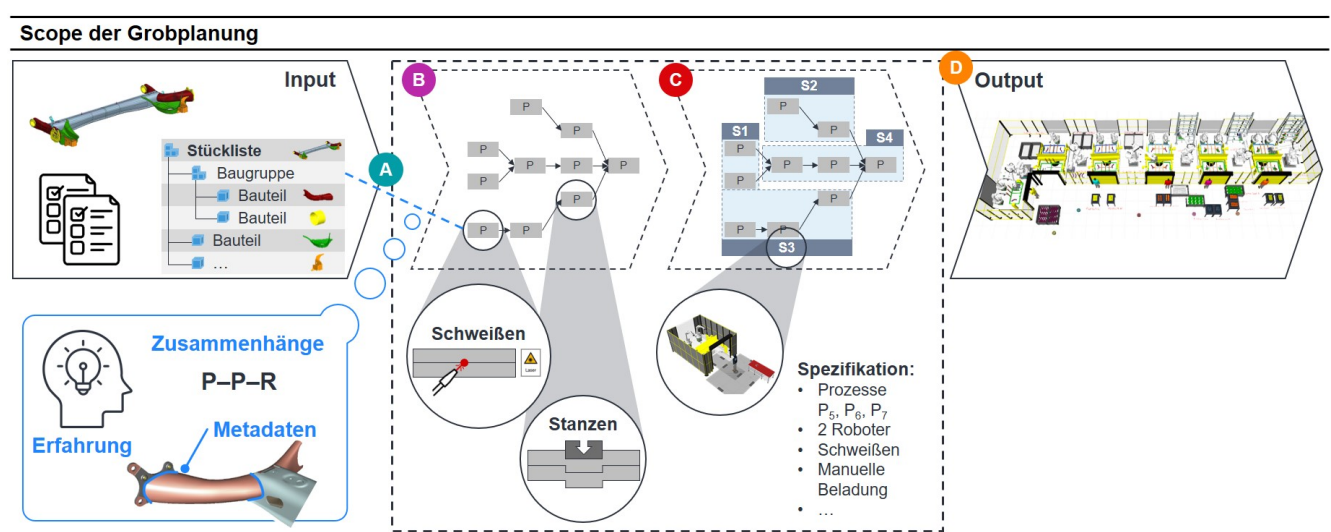


Abbildung 3.1: Scope und Teildisziplinen A, B, C und D der betrachteten Grobplanung (eigene Darstellung).

Die Grobplanung basiert auf dem aktuellen Produktentwicklungsstand, der durch die Kundenanfrage in Form von ersten Geometrieinformationen wie bspw. CAD-Daten, Stücklisten und erste Auftragsdetails wie bspw. geplante Produktionsvolumina vorliegt (Hagemann 2022). Demnach ist zu bewerten, welche Form des Inputs die in der Literatur vorliegenden Ansätze berücksichtigen (A). Weiter gibt es häufig Informationen, die nicht explizit vorliegen (Albers & Deigendesch et al. 2009). Diese sog. Metadaten sind oft nicht ohne Weiteres formalisierbar und eine erfolgreiche Planung ist abhängig vom Erfahrungswissen des Planers. Die assistierte Produktionsplanung sollte folglich zum Ziel haben, dieses Planungswissen in Form von Zusammenhängen zwischen PPR in Systemmodellen explizit zu formalisieren und verfügbar zu machen (B). Die zum Zeitpunkt der Grobplanung vorliegenden Produktinformationen und die beschriebene Erfahrung ermöglichen dem Planer dann erstens die betriebsmittelunabhängige Ableitung der notwendigen Produktionsprozesse und zweitens eine möglichst optimale Zuordnung der Prozessschritte zu Stationen des Produktionssystems (C) (Hagemann 2022). Auch hier sollte die assistierte Produktionssystemplanung beide Schritte umfassen, um schließlich eine betriebsmittelbezogene Produktionsfolge zu generieren. Ein Blick auf den Output der Grobplanung zeigt, dass die Ergebnisse dieser Planungsphase bestenfalls in digitalen Modellen festgehalten werden sollten, die in nachfolgenden Planungsphasen bis hin zum realen Betrieb der Produktion genutzt werden können (D). Im Rahmen dieses Forschungsstands sollte folglich bewertet werden, welchen Output die in der Literatur vorliegenden Arbeiten erzeugen. Es werden folgende Bewertungskriterien zusammengefasst.

- A** bewertet, ob die Planung direkt auf der Analyse verfügbarer **Produktdaten** basiert.
- B** bewertet, ob der Ansatz **Metadaten** bzw. implizites **Erfahrungswissen** als Zusammenhänge zwischen PPR bei der Prozessplanung berücksichtigt.
- C** bewertet, ob der Ansatz neben der Identifikation der Prozessschritte eine betriebsmittelbezogene Optimierung der **Produktionsfolge** enthält.
- D** bewertet, ob der Ansatz **digitale Modelle** erzeugt, die weiter genutzt werden können.

Diese Kriterien werden in Abschnitt 3.2.1 zur Bewertung von ganzheitlichen Ansätzen der assistierten Produktionssystemplanung herangezogen. Im Folgenden wird auf Kriterien zur detaillierten Bewertung und Charakterisierung in den Bereichen A, B, C und D eingegangen. Diese werden neben der Analyse in Abschnitt 3.2.1 auch für die Bewertung von spezifischen Ansätzen in den vier oben genannten Teildisziplinen (Abschnitt 3.2.2 ff) verwendet.

A: Bewertungskriterien für Ansätze zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten

Vor dem Hintergrund der motivierten Zielstellung in Kapitel 1.3 sollen vorliegende Produktinformationen analysiert werden (vgl. **A**), indem ihre Ähnlichkeit zu bereits produzierten Produkten bestimmt wird. Die vorliegende Literatur zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten unterscheidet

sich in vielerlei Hinsicht: So eignen sich z. B. abhängig vom Zweck der Ähnlichkeitsanalyse und der Gestalt der untersuchten Produkte verschiedene Formen der **Repräsentation** der Produkte. Neben Stücklisten, Feature-basierten Repräsentation oder Punktwolken wird in Kapitel 2.2.1 auf weitere, verbreitete Repräsentationsformen eingegangen. Mit der Repräsentation des Produkts und damit dem Input der Analyse einhergehend existieren verschiedene **Lösungsansätze** zur Ähnlichkeitsbestimmung. An vielen Stellen werden hierbei Verfahren des *Maschinellen Lernens* (ML) wie bspw. das *Clustering* eingesetzt. Für viele dieser Ansätze sind große Mengen gelabelter Daten notwendig (Hassani & Haley 2019), die jedoch in der industriellen Praxis so oft nicht vorliegen (Goodfellow & Bengio et al. 2016). Aus diesem Grund ist es von Interesse, die **Performance** der recherchierten Arbeiten bei geringer vorliegender Datenmenge zu bewerten. Manche Ansätze in der Literatur schaffen Abhilfe indem auf online verfügbare Benchmark Datensätze wie z. B. den *ShapeNet* Datensatz nach Chang & Funkhouser et al. (2015) zurückgegriffen wird. Diese unterscheiden sich jedoch von realen Anwendungen, weshalb weiter der **Anwendungsbereich** zu beschreiben ist. Zuletzt ist für die Produktanalyse neben der Untersuchung der Ähnlichkeit auch die Extraktion **produktionsrelevanter Produktmerkmale** relevant. Diese zu produzierenden Features sind für die Produktionsplanung zwingend erforderlich, da sie die Grundlage für die Ableitung des Prozessvorranggraphen darstellen. Zusammenfassend werden folgende Kriterien zur Bewertung des aktuellen Stands der Forschung zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten herangezogen:

- A1** charakterisiert die verwendete **Repräsentation** der Input-Daten.
- A2** charakterisiert die ausgewählten **Lösungsansätze** zur Ähnlichkeitsanalyse.
- A3** bewertet die Performance der Ansätze bei **wenig** verfügbaren (Trainings-) **Daten**.
- A4** bewertet, ob eine Anwendung auf **realen Daten aus der Industrie** durchgeführt wird.
- A5** bewertet, ob **produktionsrelevante Produktmerkmale** identifiziert werden.

B: Bewertungskriterien für Ansätze zur modellbasierten Verknüpfung von Produkt und Produktion

Um Metadaten bzw. implizites Erfahrungswissen in Form von PPR-Wechselwirkungen (vgl. **B**) in die assistierte Produktionsplanung aufzunehmen, bietet sich die konsistente Nutzung von Modellen zur Abbildung dieser Zusammenhänge an. Die Idee der durchgängigen, fachdisziplin-übergreifenden Nutzung von Modellen im *Produktentstehungsprozess* (PEP) ist ein zentrales Paradigma des *Model-Based Systems Engineering* (MBSE). Dieses hat sich jedoch aus der Entwicklung mechatronischer Systeme heraus etabliert, weshalb es für diese Analyse des Forschungsstands relevant ist zu bewerten, ob die vorliegenden Ansätze sowohl Produkte als auch Produktionssysteme und deren Wechselwirkungen abbilden können. Warum dabei ein (Produkt-) System nicht gleich einem (Produktions-) System ist und worauf bei der Bewertung geachtet werden sollte, wird im Folgenden kurz erläutert.

Um **Produkte** zu formalisieren ist zunächst eine Abbildung deren Struktur, d. h. der Baugruppe, die aus Bauteilen besteht, welche wiederum zu fertige Features enthalten, erforderlich. Hierbei ist eine konsistente Modellierung sowohl von Konstruktions- als auch Fertigungsstückliste mit unikal¹ Bauteilinstanzen von zentraler Bedeutung. Mit Bezug auf die Wiederverwendung von Planungswissen ist weiter die Abbildung eines Baukastens inkl. der Daten historischer Produktvarianten erforderlich. Als Bestandteil des Baukastens sollte ein Regelwerk implementiert werden können, das die Kombination bestimmter Merkmale einschränkt und so Zusammenhänge zwischen Modellparametern enthält.

Bei der Modellierung von **Produktionssystemen** ist die Abbildung von Prozesselementen von Bedeutung, die im Sinne der Wertschöpfung entlang des Produktentstehungsprozesses ein (Zwischen-) Produkt von einem Eingangs- in einen Ausgangszustand überführen. Das erfordert die Möglichkeit der Modellierung eines Input-Output-Prinzips. Am Beispiel des Fügens zweier Bauteile wandelt bspw. eine Ressource (abgebildet durch ein Element des Produktionssystemmodells) diese Bauteile und das zugehörige Feature (3x Input) in eine Baugruppe (1x Output). Eine konsistente Modellierung dieses Input-Output-Prinzips ist bei mehrzähligem Input bzw. Output nicht trivial. Weiter ist es bei Produktionssystemmodellen relevant, dass Reihenfolgen und Vorrangbeziehungen zwischen solchen Prozesselementen modelliert werden können. Vor diesem Hintergrund müssen vorausgehende und nachfolgende Elemente im Modell miteinander verknüpft werden können.

Um schließlich **Wechselwirkungen** zwischen PPR zu formalisieren, sind disziplinübergreifende Modelle erforderlich, die von allen am PEP beteiligten Personen genutzt und verstanden werden können (Haberfellner & Weck et al. 2019). Das kann bspw. durch spezielle Sichten oder Diagramme (vgl. Kapitel 2.2.2) umgesetzt werden. Hierbei ist zu beachten, dass das Prinzip der *single source of truth* besonders bei der disziplinübergreifenden Zuordnung von bspw. Produktfeatures zu Prozessschritten oder Prozessschritten zu Produktionsressourcen nicht verletzt wird. Ebenso ist es wichtig, dass quantitative Interdependenzen zwischen Produkt- und Produktionssystem abgebildet werden können. Ein Beispiel dafür ist der quantitative Zusammenhang zwischen den Attributen Produktfeature (z. B. Schweißnahtlänge), Equipmenteigenschaft (z. B. Schweißgeschwindigkeit Roboter) und resultierender Bearbeitungszeit. Die zur Bewertung der Ansätze zur modellbasierten Verknüpfung von Produkt und Produktion herangezogenen Kriterien ergeben sich wie folgt:

B1 bewertet, ob eine **Produktstruktur** abgebildet werden kann.

B2 bewertet, ob die Struktur von **Produktionssystemen** abgebildet werden kann.

B3 bewertet die Möglichkeit der Modellierung von **Zusammenhängen** zwischen PPR.

¹ Eine Instanz ist dann unikal, wenn sie (im Modell) nur einmal vorkommt.

C: Bewertungskriterien für Ansätze zur Optimierung von Produktionssystemen

In der Literatur wird das mathematische Problem der betriebsmittelbezogenen Optimierung von Produktionsfolgen (vgl. **C**) auch *Assembly Line Balancing Problem* (ALBP) genannt (vgl. Kapitel 2.1.3.3). Da die anwendungsspezifischen Formulierungen des ALBP in der Literatur oft schwer zu vergleichen sind, schlägt Boysen & Fliedner et al. (2007) ein Schema zur Klassifikation bestehender Ansätze vor. Das in Tabelle 3.1 dargestellte Klassifikationssystem basiert auf den **Eigenschaften der Prozessschritte** (α), den **Eigenschaften des AL-Designs** (β) sowie der Art der **Zielkriterien** (γ). Das Schema eignet sich um die vorliegende Problemstellung einzuordnen, vergleichbare Literatur zu identifizieren und schließlich relevante Kriterien zur Bewertung des aktuellen Stand der Forschung abzuleiten.

Tabelle 3.1: Klassifikationssystem für ALBP nach Boysen & Fliedner et al. (2007).

Eigenschaften des Vorranggraphen (α)		Eigenschaften von Stationen & Fließband (β)	
α_1	produktspezifischer Vorranggraph	β_1	Transport der Produkte
α_2	Struktur des Vorranggraphen	β_2	Layout der <i>Assembly Line</i> (AL)
α_3	Eigenschaften der Bearbeitungszeiten	β_3	Parallelisierung
α_4	sequenzabhängige Bearbeitungszeiten	β_4	Zuordnung von Equipment
α_5	Restriktionen bei Aufgaben-Zuordnung	β_5	stationsabhängige Bearbeitungszeiten
α_6	Prozessalternativen	β_6	weitere Konfigurationsmöglichkeiten
Zielfunktion (γ)			

Folgende Eigenschaften des ALBP sind für die Herleitung der Bewertungskriterien und die Identifikation relevanter Literatur in der vorliegenden Forschungsarbeit besonders relevant:

$\alpha_5 = type$ Der Stationstyp beeinflusst, ob eine Aufgabe zugewiesen werden kann.

$\beta_3 = pwork^2$ *multi-manned* ALBP: Mehrere ($\lambda = 2$) Roboter können gleichzeitig am Werkstück arbeiten / sich behindern.

$\beta_4 = res^\circ$ Stationen besitzen equipmentabhängige Bearbeitungs- und Handhabungszeiten. Diese werden als Stationstypen explizit modelliert.

$\beta_5 = \Delta t_{unp}$ Ein Teil der Stationszeit wird für nicht-produktive Aktivitäten aufgewendet.

$\gamma = mult$ Multikriterielle Optimierung mehrerer Zielgrößen.

In Battaia & Dolgui (2013) wird das Klassifikationsschema nach Boysen & Fliedner et al. (2007) um bspw. den industriellen Kontext des **Anwendungsfalls** erweitert und zwischen Teilefertigung, Montage und Demontage unterschieden. Boysen & Schulze et al. (2022) geht weiter auf den **Lösungsansatz** d. h. die Unterscheidung und Auswahl zwischen exakten und heuristischen Lösungsverfahren ein. Basierend auf dieser Analyse können folgende, für diese Forschungsarbeit relevante Kriterien zum Vergleich der Optimierungsansätze in der Produktionssystemplanung zusammengefasst werden: (Schäfer & Tse et al. 2025)

- C1** bewertet, ob ein **reales Anwendungsbeispiel** mathematisch optimiert wird. zugrunde liegt.
- C2** charakterisiert die Kriterien der gewählten **Zielfunktion**.
- C3** bewertet das **AL-Design** und geht auf die Eigenschaften der Stationen ein (*multi-manned*, parallele Stationen, Auswahl Stationstyp).
- C4** bewertet die **Eigenschaften der Prozessschritte** und fokussiert dabei die Vorrangbeziehungen sowie die Teilbarkeit von Aufgaben.
- C5** vergleicht die ausgewählten exakten (*E*) bzw. heuristischen (*H*) **Lösungsverfahren**.

D: Bewertungskriterien für Ansätze zur modularen Visualisierung und Simulation von Produktionssystemen

Für nachfolgende Planungsphasen ist es von Vorteil, wenn in der Grobplanung bereits digitale Modelle (vgl. **D**) erstellt werden, die weiter genutzt werden können. Die Nutzung kann dabei von der Detailplanung (z. B. Layoutplanung, Hochlaufszenarien) über einen digitalen Schatten für die Inbetriebnahme bis hin zum digitalen Zwilling während der Produktion reichen (siehe Abbildung 2.15). Overbeck (2023) zeigt, dass sich hierfür insbesondere Simulationsmodelle eignen. Um eine einfache Skalierbarkeit und Erweiterbarkeit der Modelle sicherzustellen, ist ein modularer Aufbau des Modells sinnvoll. Es ist folglich zu bewerten, ob die in der Literatur vorliegenden Ansätze **Standardmodule** (z. B. Roboter) und für den anwendungsspezifischen Teil einen **modularen Anlagenbaukasten** verwenden. Eine modulare Architektur trennt dabei Funktion und Gestalt und weist den Bausteinen des Baukastens jeweils eine spezifische Funktion zu (Göpfert 1998). Die Modellierung nach diesem Prinzip erlaubt eine einfache **Initialisierung** des Simulationsmodells basierend auf dem Planungsergebnis. Das bedeutet, dass abhängig von zuvor definierten Parametern der Zustand der Simulation automatisch initialisiert werden kann. Zuletzt variiert die Spezifikation bzw. das eingesetzte Simulationswerkzeug und damit die Gestalt des digitalen Modells stark in Abhängigkeit vom geplanten Verwendungszweck. Für die vorliegende Arbeit ist vor allem die 3D-Visualisierung des Planungsergebnisses relevant. Eine basierend auf dem Planungsergebnis automatisch initialisierte 3D-Simulation schafft durch die Aufwandsreduktion eine hohe Akzeptanz beim Nutzer (Lämmle & Seeber et al. 2020). Es ergeben sich folgende Bewertungskriterien für Ansätze zur modularen Visualisierung und Simulation von Produktionssystemen:

- D1** bewertet, ob der Ansatz **Standardmodule** von Ressourcen verwendet.
- D2** gibt an, ob das digitale Modell einem **modularen Anlagenbaukasten** folgt.
- D3** beschreibt, ob eine **automatische Initialisierung und 3D-Visualisierung** möglich ist.

3.2 Vorstellung ausgewählter Ansätze aus der Literatur

3.2.1 Ansätze zur assistierten Produktionssystemplanung

Die Aufgabe der hier analysierten Ansätze zur assistierten Produktionsplanung ist die Ableitung und Bewertung von Prozess- bzw. Fertigungsfolgen basierend auf dem aktuellen Produktentwicklungsstand. Hierbei basieren grundsätzlich alle vorgestellten Ansätze direkt auf **Produktdaten [A]** – welche Informationen genau berücksichtigt werden ist jedoch unterschiedlich [A1]. Den höchsten Informationsgehalt berücksichtigen Su (2009), Ou & Xu (2013) und Neb & Bauernhansl (2021) mit einer Planung basierend auf CAD-Daten. Ou & Xu (2013) vergleicht hierbei verschiedene Softwareanbieter wobei Neb & Bauernhansl (2021) ein Makro für das SolidWorks *Application Programming Interface* (API) entwickelt. Andere Arbeiten abstrahieren das Produkt durch produktbeschreibende Merkmale. Neben Müller (2018), Stoll (2017) und Trommer (2001) findet dies auch bei der konstruktionsbegleitenden Planung nach Fallböhrer (2000) statt. Hier wird die Grobgestalt des Produkts durch sog. gestaltbestimmende Hauptfunktionsträger beschrieben. In Jacob & Windhuber et al. (2018) wird das Produkt parametrisiert und mittels UML Diagrammen sowohl die Struktur einer Baugruppe als auch die zentralen Merkmale (z. B. Material, Abmessungen, Toleranzen) der Bauteile abstrahiert. Müller (2008) beschränkt sich auf die Repräsentation der Produktstruktur und Kröll (2007) auf eine abstrakte Funktionsbeschreibung von Elektrik-Elektronik-Systemen. In Hagemann (2022) wird ein Fügemodell des Produkts verwendet, welches vorab erzeugt werden muss. Keiner der untersuchten Ansätze analysiert die Ähnlichkeit des Produkts zu bereits produzierten Produkten oder -varianten [A2], weshalb eine Bewertung des Zusammenhangs zwischen Datenmenge und Performance einer Ähnlichkeitsanalyse nicht möglich ist [A3]. In allen Arbeiten werden reale Daten der produzierenden Industrie verwendet [A4], wobei nur drei Ansätze produktionsrelevante Produktmerkmale identifizieren [A5]. Jacob & Windhuber et al. (2018) integriert diese in die bereits erwähnte parametrisierte Produktbeschreibung in UML. In Stoll (2017) werden am Beispiel der Blechpaketefertigung für E-Motoren ausgewählte fertigungsbedingte Produkteigenschaften (wie z. B. die maximale Beanspruchbarkeit), die die Wahl des Fertigungsverfahrens oder des Werkstoffs beeinflussen, in die Bewertung integriert, jedoch nicht automatisch extrahiert. Hermann & Rey et al. (2019) berücksichtigt Bauteilcharakteristiken wie bspw. die Oberflächengüte und setzt diese in Zusammenhang mit Fertigungs- und Prüfprozessen.

Die Abbildung solcher Wechselwirkungen (z. B. zwischen Produktfeatures und der Notwendigkeit bestimmter Produktionsprozesse) ist teilweise nicht explizit modelliert und hängt von personengebundenem **Erfahrungswissen [B]** ab. Die Formalisierung solcher Metainformationen und Zusammenhänge ermöglichen nur Hermann & Rey et al. (2019), Müller (2008) und Jacob & Windhuber et al. (2018). Hermann & Rey et al. (2019) betrachtet die Auswirkung von

Produktänderungen und quantifiziert diese unter Nutzung des Kostenmodells nach Klocke & Fallböhmer et al. (1998). Dabei werden am Beispiel einer Case Study der Medizinindustrie deskriptive Produkt- und Produktionsmodelle erstellt. Für die Abbildung deren Zusammenhänge wird eine *Design Structure Matrix* (DSM) verwendet. Diese werden schließlich in einer Auswirkungsanalyse bei der Bewertung konkurrierender Fertigungs- und Prüfsequenzen verwendet. Jacob & Windhuber et al. (2018) stellt einen Ansatz zur Planung, Evaluierung und Optimierung alternativer Technologieketten für neue Produkte und unreife Technologien am Beispiel der additiven Fertigung von Zahnrädern vor. Neben den Produkten werden hierbei auch die Fertigungstechnologien inkl. betriebsmittelabhängiger Prozesszeiten und Herstellkosten (z. B. Mitarbeiterkosten, Werkzeugkosten, Stundensätze) parametrisiert und in UML-Profilen abgebildet. Weiter findet als Grundlage der rekursiven Optimierung alternativer Technologieketten eine Modellierung der Zusammenhänge zwischen Produkt- und Technologieparametern statt. Somit kann technologieabhängiges Wissen über bspw. Ober- und Untergrenzen sowie Produktanforderungen bzgl. Material, Oberflächengüte oder Toleranzen formalisiert und gespeichert werden. Diese Zusammenhänge werden verwendet, um basierend auf Produktmerkmalen alternative Technologieketten zu generieren. Im Rahmen einer Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen entwickelt Müller (2008) ein Modell zur Abbildung von Wissen über Produktionsverfahren. Hierbei geht es nicht ausschließlich um die Formalisierung des Erfahrungswissens, sondern auch darum das Wissen transparent und strukturiert zur Verfügung zu stellen. Dabei wird ähnlich zu Jacob & Windhuber et al. (2018) Verfahrenswissen mit Produktinformationen verknüpft. Hierzu verwendet Müller (2008) eine Referenzinformationsstruktur zur technologischen Verfahrensbeschreibung nach Knoche (2005) inkl. Merkmalen wie z. B. Geometrie, Werkstoff, Werkstoffeigenschaften, Abmaße und Genauigkeiten. Die Anwendung erfolgt am Beispiel der Komponentenfertigung für Luftfahrtantriebe. Neben Müller (2008) und Jacob & Windhuber et al. (2018) existiert eine Vielzahl von Ansätzen zur Generierung und Bewertung konkurrierender Technologieketten (vgl. Fallböhmer 2000, Trommer 2001, Kröll 2007, Stoll 2017 und Müller 2018). All diese Arbeiten beinhalten grundsätzlich eine Form der Modellierung von Produkt und Produktionssystem und deren Wechselwirkungen [B1-B3]. Diese sind jedoch auf allgemeine Zusammenhänge zwischen Produktfeatures und zugehörigen Fertigungsverfahren (vgl. DIN 8580 2003) und deren Sequenz beschränkt, wie es bspw. das in Kröll (2007) verwendete *House of Technology* nach Bullinger & Richter et al. (2003) zeigt. Su (2009) hingegen beginnt bereits mit der Identifikation solcher technologischer Vorrangbeziehungen aus CAD-Daten. Hierzu wird ein *Reasoning*-Ansatz basierend auf der Analyse des sog. *minimum constraint assembly state* (MCAS) durchgeführt. Die hierfür notwendigen *constraint directions* der Vorrangbeziehungen müssen im CAD-Entwurf jedoch manuell eingefügt werden. In Ou & Xu (2013) wird die optimale Prozessreihenfolge

am Beispiel der manuellen Montage eines Einzylinder-Verbrennungsmotors bestimmt. Das präsentierte Vorgehen besteht aus acht Schritten und nutzt eine Vorrangmatrix, die basierend auf den CAD-Komponenten der Baugruppe manuell zu befüllen ist. Damit besteht die Möglichkeit zur Eingabe von Nutzerinput. Die daraufhin evaluierten Sequenzalternativen werden als Ergebnis des Ansatzes rangbasiert ausgegeben.

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben und in Abbildung 3.1 dargestellt besteht die Grobplanung aus zwei zentralen Aufgaben: Erstens der betriebsmittelunabhängigen Ableitung des Prozessvorranggraphen und zweitens der betriebsmittelbezogenen Optimierung der **Produktionsfolge [C]**. Das bereits erwähnte, große Forschungsfeld der Technologiekettenplanung nutzt aggregierte Betriebsmittelinformationen (wie bspw. Maschinenstundensätze realer Anwendungen [C1]) bei der Bewertung und Auswahl von Technologieketten, verzichtet jedoch auf eine betriebsmittelbezogene Optimierung. Fallböhrer (2000) und Trommer (2001) legen einen Grundstein in der konstruktionsbegleitenden Generierung alternativer Technologieketten. Ergebnis der Arbeit nach Fallböhrer (2000) ist ein idealisiertes Vorgehensmodell, das nicht nur die Auswahl einzelner Fertigungstechnologien, sondern zudem die Generierung einer gesamten technologischen Wertschöpfungskette ermöglicht. Dies wird dem Planer als Softwaretool zur Verfügung gestellt. Ebenso präsentiert Trommer (2001) ein Vorgehen, um nicht nur die singuläre Technologieauswahl, sondern ganze Fertigungsalternativen zu bewerten. Diese Alternativen werden weiter auf die betrieblich realisierbare Teilmenge reduziert und schließlich mit einem Fuzzy *Analytic Hierarchy Process* (AHP) multikriteriell bewertet [C2]. Das Ergebnis dieses systematischen Auswahlverfahrens wird als Entscheidungsunterstützungssystem in der Praxis eingesetzt. Die Kostenbewertung in Müller (2008) basiert direkt auf historischen Daten aus der Praxis. Unter Nutzung einer historischen Arbeitsplandatenbasis werden die Produktionsalternativen verglichen. Für diesen Vergleich definiert Kröll (2007) die vier Zielgrößen Kosten, Qualität, Flexibilität und technologischer Reifegrad. Für jedes Einzelkriterium wird eine Wahrscheinlichkeitsverteilung basierend auf empirischen Daten und Regressionsanalysen oder, wenn Daten fehlen, durch Expertenschätzungen bestimmt. Im nächsten Schritt werden die Einzelkriterien mithilfe von Transformationsfunktionen normiert. Anschließend lassen sich die einzelnen Technologieelemente durch eine Monte-Carlo-Simulation zu diskreten Wahrscheinlichkeitsdichten (Histogrammen) zusammenführen und manuell (z. B. anhand der Mittelwerte) vergleichen. Müller (2018) integriert die Auslegung von Fertigungs- und Prüfverfahren in die Gestaltung von Technologieketten. Das Vorgehen zur Optimierung von Fertigungsprozess- und Prüffolgen für sicherheitskritische Bauteile setzt sich aus drei Schritten zusammen: Zunächst werden basierend auf einer featurebasierten Beschreibung des Bauteils alternative Fertigungs- und Prüfverfahren identifiziert. Geeignete Verfahren werden dann unter Berücksichtigung technologischer Wechselwirkungen zu Prozessfolgen verkettet. Zuletzt wird zur multikriteriellen Bewertung der resultierenden Alternativen ein inte-

gratives Kostenmodell für Fertigungsprozess- und Prüffolgen entwickelt. Das Vorgehen wird anhand eines Fallbeispiels aus der Medizintechnik validiert. Durch eine hohe Detaillierung sollen in Stoll (2017) auch geringe Kostenunterschiede und durch eine Systemsimulation zusätzlich stochastisches Systemverhalten berücksichtigt werden. Die Grundlage der Konfiguration allgemein zulässiger Fertigungsfolgen bilden die Zusammenhänge nach Klocke & Fallböhmer et al. (1998). Basierend auf einem Produktionsmittelkatalog und den hinterlegten Kosten bildet Stoll (2017) sog. Elementarsequenzen, die in einer Ablaufsimulation kombiniert und multikriteriell bzgl. Stückkosten, Durchlaufzeit und Qualität bewertet werden können. Am Beispiel des automobilen Karosseriebaus stellt Hagemann (2022) ein Vorgehen zur algorithmischen Konzeption von Montagesystemen vor. Berücksichtigt werden dabei, motiviert durch den Anwendungsfall, neben Fügeprozessen vor allem Handhabungsprozesse. Bei mehreren Füge- und Handhabungsrobotern pro Station [C3] erfordert dies ein stationsinternes Scheduling [C4] zur Einhaltung der Vorrangbeziehungen. Für die Reihenfolgebildung und Zuordnung von Prozessschritten zu Montagestationen wird eine exakte, einkriterielle Kostenminimierung mittels *Branch-&Bound*-Algorithmus verwendet [C5].

Das **Ergebnis [D]** der Planung wird in den analysierten Ansätzen aus der Literatur meist abstrakt dargestellt. So zeigt die Anwendung des Verfahrens nach Müller (2008) am Beispiel von Turbinenschaufeln z. B. eine Visualisierung der generierten Produktionsalternativen in einer Produkt-Primärverfahren-Matrix. Jacob & Windhuber et al. (2018) stellt alternative Technologieketten als Vergleich von normierten Stückkosten dar und visualisiert diese als Kurven über das Produktionsvolumen (*ceteris paribus*). In der Ausarbeitung von Hagemann (2022) wird die Struktur der resultierenden Montagesysteme, die modular aus standardisierten Ressourcen wie z. B. Knickarmrobotern [D1] konfiguriert werden [D2], anhand von Bildern visualisiert. Auf die Erstellung digitaler (Simulations-) Modelle wird jedoch verzichtet. Vielmehr setzt Hagemann (2022) auf eine Integration der algorithmischen Planung und des Informationsmodells in die existierende *Engineering Data Management* (EDM) Systemlandschaft. Stoll (2017) stellt das Ergebnis der Planung unter Nutzung der bereits erwähnten Elementarsequenzen in Plant Simulation¹ zur Verfügung. Im betrachteten Anwendungsbeispiel der Blechpaketefertigung umfasst der Betriebsmittelkatalog Standardmodule zum Stanzen, Laserschneiden, Laserschweißen, Klebepaketieren etc. Eine automatisierte 3D-Visualisierung [D3] der Planungsergebnisse findet nur in Neb & Bauernhansl (2021) statt. Das vorgestellte Montageplanungstool ARCaide erzeugt basierend auf CAD-Produktdaten automatisch eine Montageanleitung und visualisiert diese mittels *Augmented Reality* (AR). Hierzu werden sog. Low-Level und High-Level Features aus den CAD-Dateien extrahiert. Low-Level Features wie bspw. Punkte, Vektoren oder Flächen werden in High-Level Features kombiniert (z. B. „berühren sich“). Die Art der begrenzt vordefinierten Montagefeatures bestimmt dann die

¹ <https://plm.sw.siemens.com/de-DE/tecnomatix/products/plant-simulation-software/> (besucht am: 01.10.2024)

dargestellte AR-Animation, welche den Menschen so bei der Durchführung der manuellen Montageprozesse anleitet. Die Reihenfolge wird in Anlehnung an das Traveling-Salesman-Problem mit einem kostenminimierenden Einfügealgorithmus bestimmt.

Zwischenfazit zum Forschungsdefizit

Die Analyse des Forschungsstands zeigt deutlich, dass die in Abbildung 3.1 dargelegten vier Aufgaben A-D nicht in einem ganzheitlichen Planungsansatz kombiniert werden.

Eine Analyse der vorliegenden Produktinformationen [A] findet grundsätzlich statt. Dabei existieren verschiedene Formen des Inputs bei der Planung [A1]. Häufig werden CAD-Modelle oder produktbeschreibende Merkmale verwendet. Keine der vorliegenden Arbeiten analysiert jedoch die Ähnlichkeit dieser Produktinformationen zu bereits produzierten Produkten oder -varianten [A2-A5]. Das motiviert eine detaillierte Analyse von Literatur im Bereich der Ähnlichkeitsanalyse von Produktdaten (siehe Abschnitt 3.2.2).

Darüber hinaus findet keine ganzheitliche Betrachtung der Ableitung eines betriebsmittelunabhängigen Prozessvorranggraphen und der betriebsmittelbezogenen Optimierung des Produktionssystems als Kombination beider Planungsaufgaben statt. Eine Vielzahl von Arbeiten fokussiert die Generierung und Bewertung alternativer Technologieketten. Dazu werden jedoch ausschließlich Produktfeatures mit Fertigungsverfahren in Verbindung gesetzt [B1-B3]. Eine detaillierte Berücksichtigung von Metadaten und implizitem Erfahrungswissen [B] erfolgt dabei nur bedingt. Vereinzelt wie z. B. in Müller (2018) und Hermann & Rey et al. (2019) werden Zusammenhänge bzgl. Material, Oberflächengüte oder Toleranzen zwischen Produkt- und Technologieparametern modelliert. Dieses Defizit motiviert eine detaillierte Analyse von Literatur im Bereich der modellbasierten Verknüpfung von Produkt und Produktionssystem (siehe Abschnitt 3.2.3).

Ein weiteres Defizit ergibt sich im Bezug auf die Optimierung der Produktionsfolge [C]. Hierbei integrieren Arbeiten wie Fallböhrer (2000), Trommer (2001), Kröll (2007), Müller (2008), Stoll (2017), Jacob & Windhuber et al. (2018) und Müller (2018) zwar abstrahierte Betriebsmittelinformationen wie z. B. Maschinenstundensätze in die Generierung und Bewertung alternativer Technologieketten, verzichten jedoch auf eine explizite Optimierung der Zuordnung von Prozessschritten zu Stationen des zu planenden Produktionssystems. Dies wird ausschließlich in Hagemann (2022) im Rahmen einer kostenminimalen Optimierung einer Karosseriemontage-line betrachtet (vgl. [C1-C5]). Das motiviert eine detaillierte Analyse weiterführender Literatur im Bereich des *Assembly Line Balancing* (ALB) (siehe Abschnitt 3.2.4).

Zuletzt wird das Planungsergebnis meist sehr abstrakt dargestellt und es werden keine digitalen (Simulations-) Modelle [D] ausgegeben, die in weiterführenden Planungsphasen

genutzt werden könnten. Neben der Integration der Lösung mit modularen Standardelementen [D1-D2] in die bestehende Systemarchitektur nach Hagemann (2022) initialisiert Stoll (2017) Elementarsequenzen in Plant Simulation und visualisiert Neb & Bauernhansl (2021) mittels AR die generierten Montageanweisungen. Eine Visualisierung des resultierenden Produktionssystems [D3] bleibt jedoch aus. Das motiviert die Analyse spezifischer Ansätze zur modularen Visualisierung und Simulation von Produktionssystemen (siehe Abschnitt 3.2.5).

Da in diesem umrissenen Stand der Forschung die zuvor beschriebenen Anforderungen an die assistierte Produktionssystemplanung oftmals nicht vollständig und teilweise gar nicht berücksichtigt werden, ist eine Kombination bestehender Ansätze nicht ausreichend. Das motiviert die Analyse der spezifischen Fachliteratur in den vier zugehörigen Teildomänen. Diese wird in den folgenden Abschnitten in Ermangelung an passende, ganzheitliche Ansätze zur assistierten Produktionssystemplanung betrachtet und bewertet.

3.2.2 Ansätze zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten

Die in der Literatur vorliegenden Ansätze lassen sich über die **Repräsentation [A1]** der Produktinformation und den damit einhergehenden **Lösungsansatz [A2]** zur Analyse der Ähnlichkeit charakterisieren: Feldhusen & Nagarajah et al. (2010) beginnt hierbei beim Ursprung der Produktspezifikation und nutzt Anforderungen (engl. *Requirements*) zur Identifikation ähnlicher, bestehender Produktvarianten. Hierzu werden Produktanforderungen quantifiziert und basierend auf der resultierenden Anforderungsliste eine sog. *self-organizing map* (SOM) erstellt. Hierbei handelt es sich um eine Data Mining Methode, die komplexe numerische Abhängigkeiten darstellen und dabei hochdimensionalen Input auf einen zweidimensionalen Datenraum abbilden kann. Ziel ist schließlich der distanzbasierte Vergleich neuer Produktspezifikationen mit der SOM zur Identifikation einer *Best Matching Unit* (BMU). Ein weiteres Beispiel für die numerische Analyse liefert Schuh & Rudolf et al. (2014). Hier werden Stücklisten auf ihre Ähnlichkeit untersucht, indem die hinterlegten Artikelnummern verglichen werden. Der Ähnlichkeitsgrad wird aus der Anzahl an Gleichteilen im Vergleich zu der Gesamtzahl an verwendeten Komponenten bestimmt. Der größte Teil der Literatur befasst sich jedoch mit der Ähnlichkeitsanalyse von CAD-Daten, wie das Review in Lupinetti & Chiang et al. (2017) zeigt. Auch hier kann weiter zwischen der **Repräsentation [A1]** der 3D-Objekte unterschieden werden: Eine weit verbreitete Möglichkeit ist die Feature-basierte Ähnlichkeitsanalyse. So definiert Rea & Corney et al. (2002) vorab sog. *global shape metrics*, die anhand von Merkmalen wie bspw. Volumen, Oberfläche, Bounding-Box etc. die Geometrie charakterisieren. Anhand der Ähnlichkeit dieser Features können folglich ähnliche 3D-Modelle identifiziert werden. So geht auch Machalica & Matyjewski (2019) vor, wobei Bauteile abgebildet durch 45 geometrische Features mittels ML-Verfahren geclustert werden.

Roj & Sommer et al. (2021) nennt die Feature-Repräsentation einen digitalen Fingerabdruck der Bauteile. Dieser enthält verschiedene Oberflächentypen, deren räumliche Zentren und deren Verbindungen und Distanzen zu anderen Oberflächen. Der Fingerabdruck wird in eine Graphstruktur und weiter in 18 diskrete Attribute (z. B. Bounding-Box, Oberflächen-Verhältnis etc.) übersetzt, um schließlich über ein *k-means* Clustering die Objekte hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit zu analysieren. Um geometriebeschreibende Merkmale nicht vorab definieren zu müssen, verwendet Bai & Gao et al. (2010) den CAD-Strukturbaum, der die modellierten Features (z. B. Loch, Fase) enthält. Über Ähnlichkeiten von Sub-Bäumen können mit einem sog. *Local Matching Region Tree* (LMRT) schließlich ähnliche Modelle oder Modellkomponenten gefunden werden. In Tsai & Chang (2005) werden sog. *Fuzzy ART Networks* genutzt, um neben den modellierten Features auch technologische Attribute wie bspw. Volumen, Härte oder Oberflächengüte zu vergleichen. Sollen statt einzelnen Ähnlichkeiten zwischen Features die Bauteile global auf ihre Ähnlichkeit verglichen werden, eignen sich Punktwolken zur Repräsentation der 3D-Geometrie. Um die Geometrie möglichst genau abzubilden, sind mehrere Tausend Punkte mit jeweils drei Raumkoordinaten erforderlich. Als **Lösungsansatz [A2]** zur Verarbeitung dieses hochdimensionalen Inputs haben sich sog. *Autoencoder* (AE) etabliert. So werden in Achlioptas & Diamanti et al. (2017) Punktwolken mithilfe eines Autoencoders in eine latente Repräsentation umgewandelt. Diese latenten Vektoren werden schließlich genutzt um mittels ML-Verfahren ähnliche Objekte zu finden, neue Objekte zu generieren oder unvollständige Objekte zu komplettieren. Yang & Feng et al. (2017) stellt eine Weiterentwicklung des Autoencoders zum Clustering und zur Klassifikation von 3D-Modellen vor. Sun & Tagliasacchi et al. (2020) ergänzt diesen Ansatz um eine vorgelagerte, einheitliche Ausrichtung der Objekte im Raum. Dieses Standardvorgehen der Analyse von latenten Vektoren basierend auf Punktwolken nutzt Krahe & Marinov et al. (2022) mit einem *Recurrent Neural Network* (RNN) zur ähnlichkeitsbasierten Prädiktion nächster Konstruktionsschritte.

Die zur Verarbeitung von Punktwolken eingesetzten Architekturen erfordern eine große Menge gelabelter Trainingsdaten (Hassani & Haley 2019). Die Performance bei **wenig verfügbaren Daten [A3]** ist somit stark eingeschränkt. Lediglich der Vergleich von Anforderungen mittels SOM nach Feldhusen & Nagarajah et al. (2010) oder von Stücklisten in Schuh & Rudolf et al. (2014) ist nicht von der Menge der Trainingsdaten abhängig. Weiter ist zu unterscheiden, ob die Ansätze in der Literatur bei wenig Daten weniger gut (z. B. Bai & Gao et al. 2010, Rea & Corney et al. 2002, van Blokland & Theoharis 2021) oder gar nicht (Rest) performen.

Die Mehrzahl der untersuchten Arbeiten betrachtet reale Anwendungsfälle mit **realen Daten aus der industriellen Praxis [A4]**. Achlioptas & Diamanti et al. (2017), Yang & Feng et al. (2017) und Sun & Tagliasacchi et al. (2020) verwenden den Benchmark Datensatz *ShapeNet*, der synthetisch erzeugte 3D-Objekte aus dem Alltag enthält. van Blokland & Theoharis

(2021) verwendet einen Teil des Datensatzes des *SHape REtrieval Contest* (SHREC) 2016 nach Pratikakis & Savelonas et al. (2016), um sog. *Quick Intersection Count Change Image* (QUICCI) Deskriptoren zu erstellen. Hierbei handelt es sich um eine bestimmte Form der lokalen Ähnlichkeitsanalyse, die besonders für flächige Objekte wie z. B. Blechteile geeignet ist. Dabei wird die lokale Bauteilgeometrie über die Änderung der Anzahl der Schnittpunkte des Bauteils mit einer Reihe von dreidimensionalen Kreisen über mehrere Ebenen abgebildet. Die resultierende boolesche Darstellung ermöglicht eine effiziente Berechnung von sog. *binary dissimilarity trees*. Der Vergleich zur Ähnlichkeitsbestimmung erfolgt schließlich über das Prinzip des nächsten Nachbarn (engl. *nearest neighbour*).

Die vorgestellten Ansätze setzen einen Fokus auf die Ähnlichkeitsanalyse von Produkten. In vielen Fällen werden dabei zwar zu fertigende Features (Bai & Gao et al. 2010) oder geometrieschreibende Merkmale (Rea & Corney et al. 2002, Machalica & Matyjewski 2019) extrahiert, die einen Einfluss auf die Herstellung der Produkte haben. Jedoch wird meist keine Analyse von **produktionsrelevanten Produktmerkmalen [A5]**, die die Grundlage für die weitere Prozessplanung darstellen, durchgeführt. Während der Ansatz in Bai & Gao et al. (2010) nur einfache, vordefinierte Features, wie z. B. Löcher oder Kerben, betrachtet, analysiert Tsai & Chang (2005) die zugehörigen technologischen Attribute. Den Zusammenhang zwischen Produkteigenschaften und der Produzierbarkeit der 3D-Modelle betrachtet lediglich Krahe & Marinov et al. (2022). Zur Abbildung solcher Zusammenhänge werden im folgenden Abschnitt Ansätze zur modellbasierten Verknüpfung von PPR bewertet.

3.2.3 Ansätze zur modellbasierten Verknüpfung von Produkt und Produktion

Die nachfolgende Analyse der Ansätze aus der Literatur ist gegliedert nach dem Fokus der jeweiligen Arbeit auf die modellbasierte Spezifikation von Produkt, Produktionssystem oder deren Wechselwirkungen.

Die objektorientierte Modellierung mit SysML hat sich zum Quasi-Standard in der Entwicklung technischer **Produkte [B1]** etabliert. SysML ist ein integratives, modellbasiertes Sprachkonzept, das von der *Object Management Group* (OMG) veröffentlicht wird. Zu den relevantesten Diagrammtypen (siehe Abbildung 2.12) gehören Anforderungsdiagramme, die funktionale und nicht funktionale Anforderungen in Beziehung zu Systemelementen setzen. Dargestellt werden diese häufig in Tabellenform. Das verdeutlicht die Möglichkeit des einfachen Im- und Exports von Informationen. In Strukturdiagrammen werden Elemente als Blöcke inkl. Parametern, Beziehungen, Assoziationen, Generalisierungen sowie Abhängigkeiten zwischen Blöcken beschrieben. Verhaltensdiagramme dienen der Darstellung des Systemverhaltens und fokussieren den Zustand und die Interaktion von Systemelementen. (OMG 2017) Ein Ansatz, der SysML als Modellierungssprache nutzt, ist die INCOSE *Object-Oriented Systems*

Engineering Method (OOSEM) nach Friedenthal & Moore et al. (2015). Es handelt sich dabei um ein Top-Down Vorgehen mit einem Fokus auf die Spezifikation der logischen und physischen Systemarchitektur basierend auf Stakeholderanforderungen. Dabei ist die Methode anwendungsfallgetrieben und eignet sich für Systeme mit einem softwaretechnischen Schwerpunkt. Neben SysML bietet die *CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems* (CONSENS) nach Gausemeier & Brandis et al. (2012) eine Möglichkeit zur Beschreibung der Prinzipiellösung eines Systems. Im Fokus stehen dabei mechatronische Produktkonzepte, die z. B. in ihrer Funktion und ihrem Verhalten dokumentiert werden können. Die Schnittstelle zur Prozessplanung aus der Produktentwicklung heraus adressiert Bossmann (2007) mit einem Ansatz zur Feature-basierten Integration. Hierbei wird auf Basis verschiedener Fertigungsalternativen die Wirtschaftlichkeit eines Produktentwurfs bewertet. Die Modellierung basiert auf sog. Skelettmodellen, die das Produkt und den Prozess abstrahiert beschreiben. Die Schnittstelle zwischen den Skelettmodellen von Produkt und Prozess wird über Features als Zwangsbedingungen realisiert.

Von Seiten des **Produktionssystems [B2]** entwickelt Neuhausen (2001) einen Ansatz zur integrativen Gestaltung modularer Produktionssysteme. Das Konzept erlaubt es, Wechselwirkungen zwischen Produktkomponenten und der Produktion (auf den drei Gestaltungsebenen Linie, Station, Prozess) in einer Matrix darzustellen. Basierend darauf werden Gestaltungsmaßnahmen für die Produktionssystemplanung abgeleitet. Eine detaillierte Modellierung der Systemstruktur und technischer Abhängigkeiten findet jedoch nicht statt. Ein ähnliches Prinzip verfolgt Schäfer & Moll et al. (2019) mit der produktorientierten Konfiguration modularer Produktionsanlagen. Basierend auf einer Bauteil-, Prozess- und Produktionsmodulkonfiguration und einer parameterbasierten Verknüpfung wird über eine Webapplikation automatisch der *Programmable Logic Controller* (PLC) Code generiert. Die Instanzen werden dabei in *AutomationML* (AML) Modulprofilen spezifiziert. Um die Struktur solcher Produktionsmodule detailliert abzubilden, existiert in der Literatur eine Vielzahl von Ansätzen wie bspw. Lemaignan & Siadat et al. (2006) oder Bauer (2014), die eine Ontologie für die Produktionsdomäne vorschlagen. Die *MANufacturing's Semantics ONtology* (MASON) nach Lemaignan & Siadat et al. (2006) nutzt zur Beschreibung von Produktionssystemen ein semantisches Netz basierend auf drei Grundklassen. Hierdurch lassen sich Zusammenhänge zwar abbilden, jedoch liegt der Fokus auf der Beschreibung von mechanischen Produkten. Weiter fehlen konkrete Konzepte zur Formalisierung von Montageprozessen oder der Modellierung von Materialflüssen. Das behebt das *Ontology for Production System Concept* (ProSyCo) nach Bauer (2014). Hierbei handelt es sich um ein wissensbasiertes System zur Konzeption von Produktionssystemen. ProSyCo bietet ein Grundvokabular zur semantischen Repräsentation von Planungsinformationen, das in Abbildung 3.2 dargestellt ist. Die Ontologie betrachtet jedoch keine Verbindungselemente (z. B. Schweißnähte) oder alternative Ressourcenfolgen.

ProSyCo Ontologie

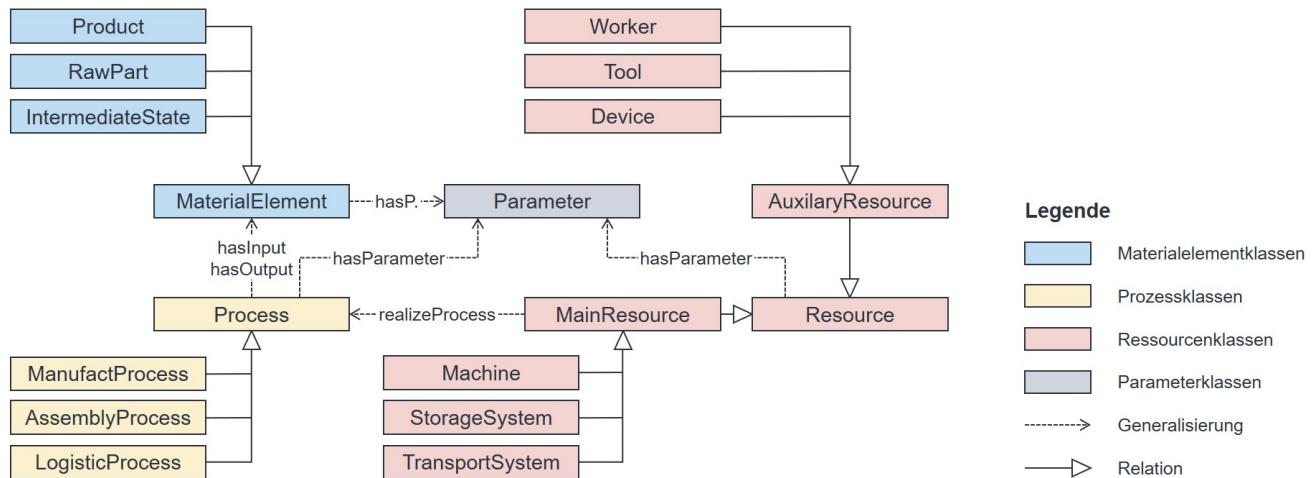


Abbildung 3.2: Übersicht der ProSyCo-Ontologie (eigene Darstellung nach Bauer 2014).

Als Ansätze, die eine explizite Modellierung der **Wechselwirkungen [B3]** zwischen Produkt und Produktion fokussieren, sind Feldmann & Schmuck et al. (2008), Gausemeier & Brandis et al. (2012) und Cadet & Sinnwell et al. (2017) zu nennen. Auf das Grundprinzip des PPR-Modells wird bereits in Kapitel 2.2.1 eingegangen. An dieser Stelle soll kurz gezeigt werden, wie dieses Prinzip im Ansatz nach Feldmann & Schmuck et al. (2008) durch ein Software-Tool zur Planung zyklisch verketteter Produktionsanlagen umgesetzt wird. Ziel ist die Prognose von Preis-, Kosten- und Leistungsdaten basierend auf alternativen Systemkonfigurationen. Abbildung 3.3 zeigt das PPR-Modell am Beispiel eines Elektromotors. Das Produkt – lediglich abgebildet über eine Produktstruktur – bildet den Ausgangspunkt der Planung. Weiter beschreibt der Prozess die Aktivitäten, die zur Veränderung des Produkts beitragen. Für die Realisierung der Prozesse werden diese schließlich Ressourcen zugeordnet.

PPR Modell

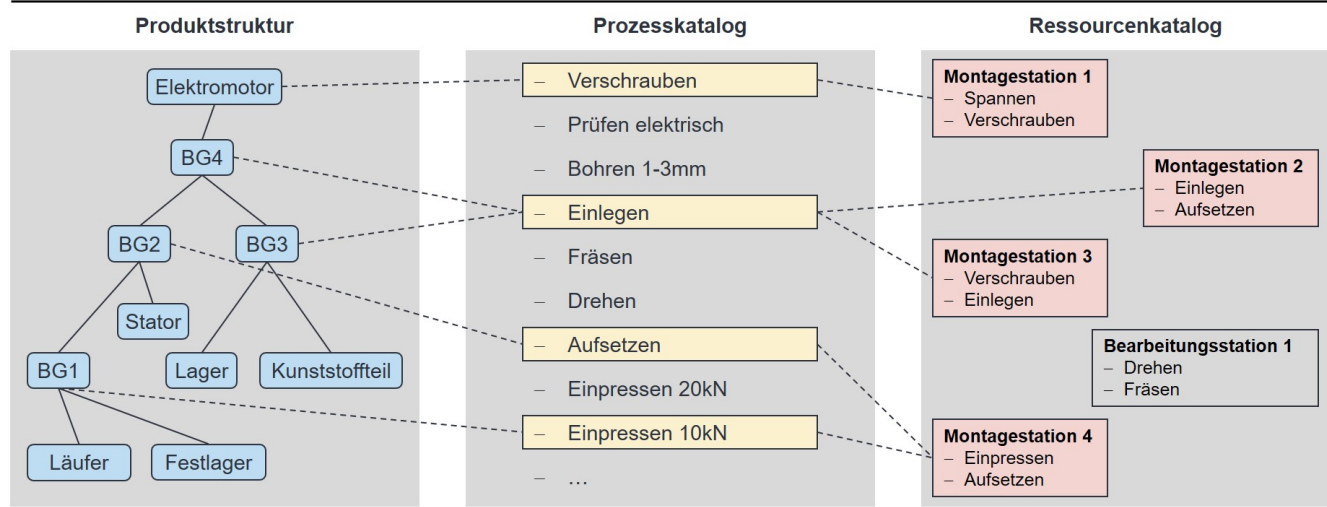


Abbildung 3.3: PPR-Modell am Beispiel eines Elektromotors (eigene Darstellung nach Feldmann & Schmuck et al. 2008).

Ein weiterer Ansatz zur integrierten und modellbasierten Verknüpfung von Produkt und Produktionssystem bietet Gausemeier & Brandis et al. (2012) mit der Spezifikationstechnik CONSENS. Sie basiert auf dem Verständnis, dass die Prinzipiellösung eines Systems durch zehn Partialmodelle beschrieben werden kann. Diese Partialmodelle lassen sich den zwei Bereichen Produktkonzeption (Umfeld, Anwendungsszenarien, Funktion, Wirkstruktur, Verhalten, Gestalt) und Produktionssystemkonzeption (Prozesse, Ressourcen, Gestalt) zuordnen. Die Schnittstelle zwischen Produkt und Produktion bilden die Anforderungen. Zwar existiert hierdurch die Möglichkeit Wechselwirkungen zu beschreiben, jedoch mangelt es an einer konkreten Syntax. In Cadet & Sinnwell et al. (2017) wird als Ergebnis des Forschungsprojekts mecPro² ein Ansatz für die modellbasierte Entwicklung von Produkten und Produktionssystemen vorgestellt. Der Ansatz integriert ein Prozessframework zur Beschreibung von Prozessmodulen sowie Aktivitäten in der Produktentwicklung und ein Architekturframework. Die entwickelte Ontologie zur Beschreibung von Elementen und Beziehungen wird in einem SysML-Profil implementiert. Darin werden die Produktmerkmale als Verbindung zu den Produktionsprozessen modelliert. Diese setzen ein bestimmtes Produktionsverfahren um, wobei Produktionsressourcen jeweils eine Produktionsprozess-Fähigkeit besitzen. Den interdisziplinären Charakter setzt die Ontologie mittels Sichtweisen (engl. *viewpoints*) und Sichten (engl. *views*) um, die bestimmte Teilmengen der Ontologie auf der Grundlage eines Anliegens adressieren. Dem Ansatz folgend werden die Sichten durch Zuweisung von Stakeholder-Rollen zur Durchführung von Aktivitäten des Prozessframeworks verwendet.

3.2.4 Ansätze zur Optimierung von Produktionssystemen

In der Literatur existiert eine Vielzahl von Ansätzen im Bereich des (R)ALB. Die umfassende Literaturstudie in Battaia & Dolgui (2013) umfasst bereits mehr als 300 Arbeiten vor dem Jahr 2013, was die große Breite der Literatur in dieser Teildisziplin verdeutlicht. Der vorliegende Stand der Forschung fokussiert daher die jüngeren Entwicklungen und verweist auf den Literaturvergleich in Ghosh & Gagnon (1989) für die Anfänge des ALBP. Aus der verbleibenden Vielzahl von Publikationen wird im Folgenden auf ähnliche bzw. für diese Arbeit relevante Artikel eingegangen. Das sind solche, die eine Einprodukt-Linie betrachten, bei denen die Taktzeit vorgegeben ist (siehe Abbildung 2.7) und das Problem als MILP ohne stochastische Komponente formuliert ist.

Um bei der Modellierung getroffene Annahmen zu verstehen, ist eine Betrachtung des **Anwendungsbereichs [C1]** erforderlich: Ein Großteil der untersuchten Literatur in diesem Feld betrachtet keinen realen Anwendungsfall, sondern verwendet fiktive Benchmark Datensätze aus der Literatur. Reale Anwendungsfälle werden lediglich von Albus & Seeber (2021) mit einer manuellen Montagelinie, Chen & Cheng et al. (2018) mit einer Automobil-Montagelinie, Li & Qiao et al. (2022) mit einer Fertigungslinie im automobilen Motorenbau, Michels & Lopes

et al. (2018) mit einer Schweißlinie im Karosseriebau, Navas-Barrios & Riquett-Rodríguez et al. (2022) mit einer Batterie-Fertigungsline, Nugraha & Ma'ruf et al. (2021) mit dem Beispiel der Mensch-Roboter-Kollaboration und Yuan & Xu et al. (2015) mit der Fertigung von Schwerlastfahrzeugen und Radladern vorgestellt.

In der Realität ist die Produktionssystemplanung häufig Gegenstand mehrerer, zu optimierender Zielkriterien. Im Hinblick auf die modellierte **Zielfunktion [C2]** betrachten viele Ansätze in der Literatur ein einkriterielles Problem: Da hier die Taktzeit durch die vom Kunden nachgefragte Menge vorgegeben und damit fix ist (siehe Abbildung 2.7), bleibt als Optimierungskriterium insbesondere die Anzahl der Stationen. Ein großer Teil der analysierten Arbeiten bewertet das Eröffnen einer Station rein monetär, sodass folglich eine Kostenfunktion minimiert wird. Das hat den Vorteil, dass gleichzeitig das zusätzliche Stationsequipment (z. B. die Anzahl Roboter oder Mitarbeiter) in die Zielfunktion mit aufgenommen werden kann und schließlich eine Gesamt-Kostenfunktion gebildet wird. In Chen & Cheng et al. (2018), Chi & Qiao et al. (2022), Fattahi & Roshani et al. (2011), Lopes & Michels et al. (2021), Navas-Barrios & Riquett-Rodríguez et al. (2022), Yilmaz & Yilmaz (2020) und Yuan & Xu et al. (2015) wird die einkriterielle Zielfunktion auf Basis der Anzahl an Stationen bzw. Mitarbeitern gebildet. Ein weiterer Faktor ist die Ergonomie, die Abdous & Delorme et al. (2022) sowohl als Ermüdungs- und Erholungsmodell als auch als Ergonomie-Investmentkosten abbildet. Besonders in jüngster Vergangenheit gewinnt der Aspekt der Nachhaltigkeit an Bedeutung: Chi & Qiao et al. (2022) berücksichtigt diese durch den Energieverbrauch und Li & Qiao et al. (2022) durch den CO₂-Ausstoß. Eine abstraktere Zielfunktion bildet Lopes & Pastre et al. (2020) mit der Länge der AL. Im Bereich des *Job Shop Scheduling* (JSS) (in Kapitel 2.1.3.3 als verwandtes Problem vorgestellt) werden aufgrund der höheren Informationsverfügbarkeit im laufenden Betrieb von Produktionsanlagen auch andere Optimierungskriterien wie bspw. die Auslastung (Huang & Guan et al. 2018) und der spezifische Energieverbrauch (Roth & Kalchschmid et al. 2021) betrachtet.

Bezogen auf das **AL-Design [C3]** der analysierten Ansätze lässt sich eine große Vielfalt identifizieren: Beim *multi-manned* ALB können einer Station mehrere Roboter (oder Arbeiter) zugewiesen werden. Um die Einhaltung der geltenden Vorrangbeziehungen auch innerhalb einer Station sicherzustellen, ist ein stationsinternes Scheduling notwendig. Dieser Aspekt wird z. B. von Yuan & Xu et al. (2015) im Rahmen eines sog. *two-sided* ALBP berücksichtigt. Dabei kann das Werkstück von beiden Seiten der AL gleichzeitig bearbeitet werden und es gibt je Seite mehrere mögliche Positionen der Arbeiter. Das Eröffnen parallel angeordneter Stationen lässt nur ein Ansatz in der Literatur zu: Michels & Lopes et al. (2018) bildet parallele Stationen über einen Parallelitätsfaktor der Station beim Punktschweißen im automobilen Karosseriebau in Brasilien ab. Durch die asynchrone Beladung paralleler Stationen ist die

selektive Halbierung der Gesamt-Bearbeitungszeit dieser Stationen möglich. Dies ist insbesondere dann nützlich, wenn es einzelne unteilbare Aufgaben gibt, deren Bearbeitung wesentlich länger dauert als die Bearbeitung der restlichen Aufgaben. Zuletzt ist bzgl. des AL-Designs anzumerken, dass über die Hälfte der Modelle, die hier vorgestellt werden, eine Entscheidung über die Auswahl des Stationsequipment und damit des Stationstypen beinhalten. Dabei ist zu unterscheiden, ob das Equipment separat ausgewählt und beliebig miteinander kombiniert werden kann (siehe Albus & Seeber 2021) oder ob die Equipment-Kombinationen zu Stationstypen bzw. -varianten zusammengefasst werden (siehe Abdous & Delorme et al. 2022). Die Wahl des Equipments kann sich dabei auf zwei Weisen auf die Bearbeitung der Aufgaben auswirken: Entweder erfordern bestimmte Aufgaben bestimmtes Equipment (siehe Şahin & Kellegöz 2019) oder die Bearbeitungsdauer ist equipmentabhängig (siehe Nugraha & Ma'ruf et al. 2021).

Bei der mathematischen Modellierung des ALBP sind zudem die **Eigenschaften der Prozessschritte [C4]** relevant: Die Berücksichtigung von Vorrangbeziehungen als Grundeigenschaft des ALBP ist auf Stationsebene in allen analysierten Ansätzen grundsätzlich umgesetzt. Das bereits erwähnte stationsinterne Scheduling stellt darüber hinaus sicher, wie stationsintern mit Vorrangbeziehungen umgegangen wird. Von den verglichenen Arbeiten, die eine *multi-manned* AL betrachten, nehmen mit Ausnahme von Michels & Lopes et al. (2018) alle ein solches Scheduling in ihr Modell auf. In der Regel wird das Scheduling mit Start- und Endzeitpunkten für jede Aufgabe modelliert, wie es bei Fattahi & Roshani et al. (2011), Lopes & Pastre et al. (2020), Şahin & Kellegöz (2019) und Yilmaz & Yilmaz (2020) der Fall ist. Roshani & Giglio (2015) stellt hierfür ein vergleichsweise kompaktes Modell vor. Michels & Lopes et al. (2018) kann auf ein stationsinternes Scheduling verzichten, da die Anwendung des Modells das Punktschweißen im Karosseriebau behandelt und zwischen den einzelnen Schweißpunkten keine stationsinternen Vorrangbeziehungen existieren. Bei der Zuordnung von Aufgaben zu Stationen wird in der Literatur im Allgemeinen von einer Unteilbarkeit der einzelnen Prozessschritte ausgegangen. Das bedeutet, dass eine Aufgabe immer vollständig auf einer Station bearbeitet werden muss. Diese Bedingung wird bspw. beim Fügen durch Schweißen verletzt (siehe Kapitel 2.1.3.3). Im Stand der Forschung betrachten ausschließlich Chi & Qiao et al. (2022) und Li & Qiao et al. (2022) ein sog. *cross-station design*, bei dem die Bearbeitung einer Aufgabe in der vorgelagerten Station begonnen und in der nachfolgenden Station beendet werden kann. Diese Möglichkeit ist jedoch auf die zwei zur betrachteten (Haupt-)Station adjazenten Stationen beschränkt.

Abschließend ist ein kurzer Vergleich der gewählten **Lösungsansätze [C5]** interessant: Abhängig von der Komplexität des betrachteten Problems setzen die analysierten Arbeiten sowohl heuristische als auch exakte Lösungsverfahren ein. Die Komplexität wird dabei

maßgeblich von der Art und Anzahl der Variablen und der Problemgröße beeinflusst. Letztere hängt wiederum von der Anzahl der Aufgaben und der Equipmentkombinationen ab. Bei langen Rechenzeiten von exakten Lösungsverfahren wie z. B. dem *Branch-&Bound*- oder *Branch-&Cut*-Algorithmus (bspw. eingesetzt in Fattahi & Roshani et al. 2011) sind Heuristiken ein bewährtes Mittel, um in kurzer Zeit gute Lösungen zu finden (vgl. Kapitel 2.1.3.2).

3.2.5 Ansätze zur modularen Visualisierung und Simulation von Produktionssystemen

Im Bereich der Modularisierung digitaler (Simulations-) Modelle von Produktionssystemen existiert eine Vielzahl von Ansätzen in der Literatur. So fokussieren z. B. Schuh & Brussel et al. (2003) mit dem Konzept der *Modular Plant Architecture* (MPA), Spath & Baumeister et al. (2002) mit einer Fabriktypologisierung oder Zäh & Wagner (2003) mit der sog. Minifabrik eine Modularisierung auf Fabrikebene. Mit dem Betrachtungsgegenstand der Simulation von Produktionssystemen (siehe Abbildung 2.1 für die Ebenen der Produktion) ist für die vorliegende Arbeit eine Modularisierung auf Anlagenebene relevant, weshalb sich der folgende Stand der Technik darauf beschränkt. Für eine Identifikation von **Standardmodulen [D1]** für die Produktion ist die Schnittstelle zum Produkt interessant. In Müller & Esser et al. (2011) werden vier Schritte zur Modularisierung von Montagesystemen vorgestellt. Zu Beginn werden Produktmerkmale analysiert und in sog. Verantwortlichkeiten überführt. Eine Verantwortlichkeit bezeichnet dabei einen abgeschlossenen Teilumfang der Montageaufgabe. Diese werden anschließend funktionalen Standardmodulen zugeordnet, welche zuletzt ausgestaltet werden. Henkenjohann & Joppen et al. (2021) präsentiert ein Vorgehen zur Identifikation und Spezifikation von Standardmodulen der Produktion für Materialflusssimulationen. Neben einer Analyse der Anforderungen und bestehender Produktionsressourcen fokussiert der Ansatz die Modellierung einer aktiven Struktur, die das Produktionssystem in alle relevanten Elemente und Verbindungen unterteilt. Dieser gerichtete Graph wird anschließend in eine *Design Structure Matrix* (DSM) überführt, die den Informations- oder Materialfluss zwischen den Systemelementen (Zeilen und Spalten) darstellt. Über die Analyse der internen und externen Verbindungen eines Systemelements findet schließlich die Modularisierung statt. Für jedes identifizierte Modul wird zuletzt je ein Umfeld- (CONSENS) und ein Verhaltensmodell (GRAFCET) spezifiziert. Lämmle & Seeber et al. (2020) nutzt Knickarmroboter als Standardmodule für die Modellierung von *pick and place* Aufgaben.

Als eine zentrale Grundlage der vorliegenden Arbeit für die Erstellung eines modularen **Anlagenbaukastens [D2]** werden in der Literatur die Arbeiten nach Kluge (2011) und Kuhn & Müller et al. (2020) identifiziert. Kluge (2011) präsentiert eine Methodik zur fähigkeitsbasierten Modellierung modularer Montagezellen für die Grobplanungsphase. Hierbei findet

eine Gliederung der Ressourcen in Betriebsmittel (Basismodule, Transportmodule, Aufbewahrungselemente, Versorgungselemente, IT-Elemente) und Einsatzmittel (Prozessmodule, Transportmittel, Aufbewahrungsmittel, Peripheriemodule) statt. Diese werden anschließend in einer übergeordneten Struktur zusammengefasst. Ein Beispiel für die modulare Verkettung zweier Stationen kann Abbildung 3.4 entnommen werden.

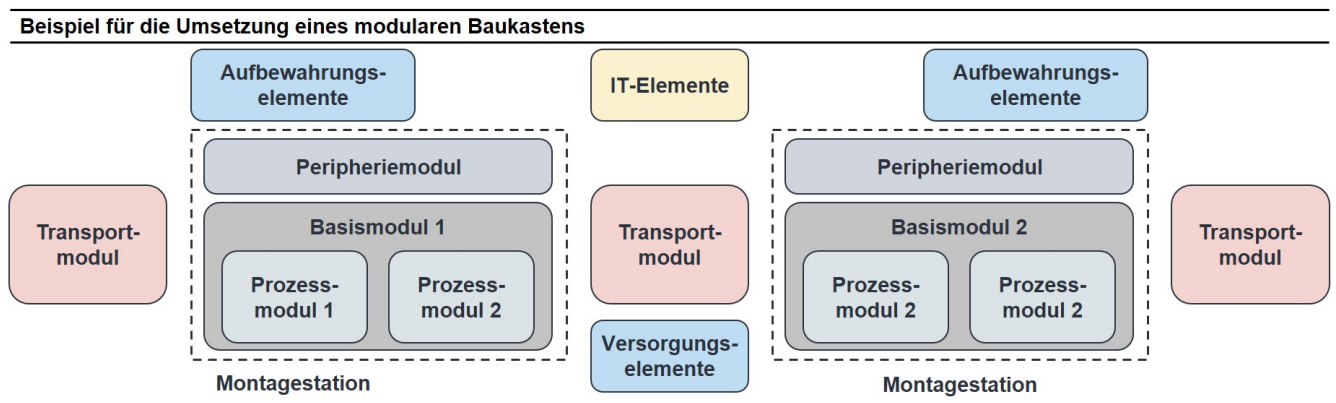


Abbildung 3.4: Modularisierung zweier Stationen (eigene Darstellung nach Kluge 2011).

Eine Station besteht aus einem Basismodul und jeweils mindestens einem Prozess- und einem Peripheriemodul. Das Basismodul ist als Grundlage der Station mit verschiedenen Prozessmodulen kompatibel. Durch die Kopplung des Basismoduls mit einem Prozessmodul wird die produktspezifische Anpassung realisiert. Basismodule beinhalten die modulinternen Transporteinrichtungen, Schnittstellen zur Datenübertragung sowie die Steuerungstechnik. Peripheriemodule reichen von automatisierten Zuführeinrichtungen bis zur manuellen Bereitstellung von Materialien. Beim Transport werden Transportmodule und Transportmittel unterschieden. Hierbei stellt zum Beispiel ein standardisierter Werkstückträger als Transportmittel die Verbindung zwischen dem Produkt und dem Transportmodul her. (Kluge 2011) Der modulare Baukasten nach Kuhn & Müller et al. (2020) ist sehr ähnlich aufgebaut: Hier wird zwischen Basis-, Prozess-, Transport- und Zuführmodulen unterschieden. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf manuellen Montagestationen, welche durch Kombination dieser Module erzeugt werden können. Mehrere Stationen können wiederum durch Transportmodule zu einem Montagesystem verbunden werden. Einen Schritt weiter in der Abbildung der internen Ablaufstruktur geht Landherr (2014). Hier werden Module auf Grundlage von hierarchischen, strukturellen und funktionalen Gegebenheiten charakterisiert. Die Schnittstellen der Module werden ebenso abgebildet, indem bspw. erforderliche, mögliche und unmögliche Vorgänger und Nachfolger identifiziert werden. Zuletzt vereinfacht Gönnheimer & Kimmig et al. (2019) schlüsselfertige Sondermaschinen anhand eines modularen Baukastens, während Stähr & Stricker et al. (2020) eine hierarchische Modularisierung auf vier Ebenen am Beispiel einer Montagelinie präsentiert.

Wird ein solcher modularer Baukasten anhand eines Simulationswerkzeugs implementiert, ermöglicht das eine einfache oder gar automatisierte **Initialisierung [D3]** der Modellkonfiguration basierend auf zuvor festgelegten Parametern. Stähr & Stricker et al. (2020) stellt hierzu ein autonomes Planungstool für modulare Montagesysteme vor. Basierend auf der zuvor erwähnten Modularisierung liegt der Fokus des Ansatzes auf der Definition von Skalierungsmechanismen, die im Rahmen einer Skalierungsstrategie abhängig von den analysierten Szenarien aktiviert werden können. Die Szenarien werden basierend auf externen Faktoren, die vordefinierte Rezeptorkennzahlen beeinflussen, mit einer Monte Carlo Simulation erzeugt. Die Auswahl der modularen Skalierungsmechanismen zur Initialisierung der Modellkonfiguration erfolgt im Rahmen eines Markov Entscheidungsprozesses. Gönnheimer & Kimmig et al. (2019) und Lämmle & Seeber et al. (2020) erweitern diese Idee um den Aspekt der automatisierten **Visualisierung [D3]**. Gönnheimer & Kimmig et al. (2019) entwickelt eine Konfigurationsplattform zur automatisierten Ableitung und 3D-Visualisierung schlüsselfertiger Produktionssysteme basierend auf Produktmerkmalen. Die Planung basiert auf dem Abgleich notwendiger Produktionsprozessen mit den Fähigkeiten der Produktionsmodule. Die Implementierung des Abgleichs nutzt AML und die JavaScript Object Notation. Die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Produktanforderungen und Moduleigenschaften werden in SysML-Profilen hinterlegt. Die Visualisierung erfolgt schließlich mit PolyVR¹ – einer Virtual Reality Engine des Instituts für Informationsmanagement am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Lämmle & Seeber et al. (2020) setzt ebenfalls auf AML, nutzt jedoch für die 3D-Simulation die Software Visual Components. Der Ansatz fokussiert dabei die automatische Übertragung von Arbeitsabläufen und Prozessen in die 3D-Umgebung. Hierzu werden statische Standardmodule in einem Katalog gespeichert und mit den AML-Layoutdaten initialisiert. Das Vorgehen wird am Beispiel verschiedener Bewegungsabläufe (engl. *motion statements*) einer *pick and place* Aufgabe vorgestellt und mit zwei Robotern zur Ausführung von Handlings- und Schraubprozessen validiert.

3.3 Forschungsdefizit und Forschungsfragen

Die vorausgehenden Abschnitte zeigen, dass ein umfassender Stand der Forschung im Bereich der assistierten Produktionsplanung und den zugehörigen Teildomänen vorliegt. Eine ganzheitliche Bewertung dieses Forschungsstands anhand der zuvor abgeleiteten Anforderungen an einen Lösungsansatz ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Die Tabelle zeigt für jede Arbeit inwieweit die Anforderungen nicht, teilweise oder gänzlich erfüllt bzw. berücksichtigt sind und komplettiert dies durch charakterisierende Angaben (vgl. [A1, A2, C2, C5]). Im Folgenden wird das Forschungsdefizit, welches sich aus der Bewertung ergibt, kurz zusammengefasst.

¹ Open Source: <https://github.com/Victor-Haefner/polyvr> (besucht am: 01.10.2024)

		A	B	C	D	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	C1	C2	C3			C4	C5	D1	D2	D3			
		Analyse Produktdat.	Metadaten/Erfahrung	Produktionsfolge	Digitale Modelle	Repräsentation der Input-Daten	Lösungsansatz zur Ähnlichkeitsanalyse	Perf. wenig Daten	Reale Daten	Prod.-rel. Merkmale	Produktstruktur	Produktionsstruktur	PPR-Wechselw.	Reales Beispiel	Zielfunktion des Optimierungs-problems	multi-manned	Parallele Stationen	Ausw. Stationstyp	S.-internes Sched.	Teilbarkeit v. Aufg.	Lösungsverfahren	Standardmodule	Modularer Aufbau	Auto. Visualisierung		
●	erfüllt / berücksichtigt																									
◐	teilweise erfüllt																									
○	nicht erfüllt																									
-	nicht vorhanden																									
X	Bewertung nicht möglich																									
E	Exakt																									
Assistierte Produktionssystemplanung	FALLBÖHMER (2000)	●	○	◐	○	Feature	-	X	●	○	◐	◐	◐	●	multikrit.	○	○	○	○	○	-	X	X	X		
	HAGEMANN (2022)	◐	○	●	◐	Füge-modell	-	X	●	○	○	○	○	●	Kosten	●	○	○	●	○	E	◐	◐	○		
	HERMANN ET AL. (2019)	◐	●	○	○	Produkt-änderung	-	X	●	◐	◐	◐	◐	X	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X		
	JACOB ET AL. (2018)	●	◐	◐	◐	UML (Merkm.)	-	X	●	◐	◐	◐	◐	●	multikrit.	○	○	○	○	○	-	○	○	◐		
	KRÖLL (2007)	◐	○	◐	○	Produkt-funktion	-	X	●	○	◐	◐	◐	●	multikrit.	○	○	○	○	○	-	X	X	X		
	MÜLLER (2008)	◐	●	◐	◐	Produkt-struktur	-	X	●	○	◐	◐	◐	●	Kosten	○	○	○	○	○	-	○	○	◐		
	MÜLLER (2018)	●	○	◐	○	Feature	-	X	●	○	◐	◐	◐	●	multikrit.	○	○	○	○	○	-	X	X	X		
	NEB & BAUERNHANSL (21)	●	○	◐	◐	CAD	-	X	●	○	○	○	○	●	Kosten	○	○	○	○	○	-	◐	○	◐		
	OU & XU (2013)	●	◐	○	○	CAD	-	X	●	○	○	○	○	X	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X		
	STOLL (2017)	●	○	◐	◐	Merkm.	-	X	●	◐	◐	◐	◐	●	multikrit.	○	○	○	○	○	-	◐	○	◐		
	SU (2009)	●	○	○	○	CAD	-	X	○	○	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X		
	TROMMER (2001)	●	○	◐	○	Feature	-	X	●	○	◐	◐	◐	●	multikrit.	○	○	○	○	○	-	X	X	X		
	Ähnlichkeitsanalyse von Produkten	ACHLIOPTAS ET AL. (2017)					Punkte-wolke	Auto-encoder	○	○	○															
BAI ET AL. (2010)						Struktur-baum	LMRT	◐	●	◐																
FELDHUSEN ET AL. (2010)						Anford.	SOM	●	●	○																
KRAHE ET AL. (2022)						Punkte-wolke	Auto-encoder	○	●	●																
MACHALICA ET AL. (2019)						Merkm.	Clustering	○	●	○																
REA ET AL. (2002)						Merkm.	similarity matrix	◐	●	○																
ROJ ET AL. (2021)						Merkm.	Clustering	○	●	○																
SCHUH ET AL. (2014)						Stückliste	num. Analyse	●	●	○																
SUN ET AL. (2021)						Punkte-wolke	Auto-encoder	○	○	○																
TSAI & CHANG (2005)						Feature	Fuzzy ART	○	●	●																
VAN BLOKLAND ET AL. (21)						QUICCI	nearest neighbor	◐	○	○																
YANG ET AL. (2017)						Punkte-wolke	Auto-encoder	○	○	○																
Modellbasierte Verknüpfung von P. & P.	BAUER (2014)										◐	●	◐													
	BOSSMANN (2007)										●	◐	◐													
	CADET ET AL. (2017)										◐	◐	●													
	FELDMANN ET AL. (2008)										◐	◐	●													
	FRIEDENTHAL ET AL. (2012)										◐	◐	◐													
	GAUSEMEIER ET AL. (2012)										●	◐	●													
	LEMAIGNAN ET AL. (2008)										◐	●	◐													
	NEUHAUSEN (2001)										○	●	◐													
	OMG (2017)										●	◐	◐													
	SCHÄFER ET AL. (2019)										◐	●	◐													

- rücksichtigung von Metadaten oder Erfahrungswissen bei der Ableitung des Prozessvorranggraphen findet nur eingeschränkt statt.
- C** Eine Kombination der betriebsmittelunabhängigen Ableitung des Prozessvorranggraphen und der betriebsmittelbezogenen Optimierung von Fertigungsfolgen findet nicht statt.
 - D** Eine Integration des Planungsergebnisses durch eine Visualisierung und Simulation des resultierenden Produktionssystems findet nicht statt.

Da eine Kombination der betrachteten Ansätze folglich nicht ausreicht, um alle Anforderungen an den Lösungsansatz vollumfänglich zu berücksichtigen, werden weiterführende Arbeiten im Bereich der vier Teildisziplinen untersucht.

Hierbei wird deutlich, dass eine Vielzahl spezifischer Ansätze zur **Ähnlichkeitsanalyse von Produkten** vorliegt. Diese lassen sich primär gemäß der vorliegenden Produktrepräsentation [A1] und dem damit einhergehend ausgewählten Lösungsansatz [A2] gruppieren. Vereinfachend lässt sich sagen, dass es zwei Klassen gibt: Die Verarbeitung von Punktwolken mit ML-Methoden (vorrangig Autoencoder Architekturen) erfordert große Mengen an Trainingsdaten [A3] und wird in der Literatur meist nur mit Benchmark Datensätzen präsentiert [A4]. Lediglich Krahe & Marinov et al. (2022) zeigt die industrielle Anwendbarkeit. Weiter existieren Ansätze zum Clustering von 3D-Modellen basierend auf geometriebeschreibenden Merkmalen oder extrahierten Features. Diese sind jedoch in ihrer Genauigkeit der Ähnlichkeitsbestimmung eingeschränkt. Ein Ansatz, der hier hervorgehoben werden kann, ist der lokale Ähnlichkeitsvergleich mittels QUICCI-Deskriptoren nach van Blokland & Theoharis (2021). Dieser ist im Vergleich zu Punktwolken bei flächigen Bauteilen wie z. B. Blechteilen besser geeignet. Weiter ist anzumerken, dass nur wenig Ansätze die Identifikation produktionsrelevanter Produkteigenschaften [A5] betrachten. So betrachtet Tsai & Chang (2005) bspw. technologische Produktattribute, während Krahe & Marinov et al. (2022) die Produzierbarkeit im Zusammenhang mit hierfür extrahierten Produktmerkmalen bewertet.

Für die Abbildung solcher Zusammenhänge existieren Methoden und Werkzeuge zur **modellbasierten Verknüpfung von Produkt und Produktion**. Viele dieser Ansätze sind bis heute sehr domänenbezogen. So bildet Gausemeier & Brandis et al. (2012) z. B. die Produktstruktur [B1] mechatronischer Systeme sehr detailliert ab, wohingegen Lemaignan & Siadat et al. (2006) mit MASON oder Bauer (2014) mit ProSyCo eine Ontologie für die Produktionsdomäne [B2] vorschlägt. Der fachbereichsübergreifende, konsistente Einsatz von Modellen im PEP ist ein zentrales Paradigma des MBSE. Beispiele für diese durchgängige Verknüpfung von Produkt und Produktion [B3] liefern Feldmann & Schmuck et al. (2008) mit dem PPR-Modell und Cadet & Sinnwell et al. (2017) mit der mecPro² Ontologie. Das Defizit im Bezug auf die Anforderungen an den Lösungsansatz ergibt sich hier vor allem aus der mangelnden

Möglichkeit der Abbildung von planungsspezifischen Zusammenhängen wie bspw. Vorrangbeziehungen. Die Darstellung von Reihenfolgen berücksichtigt so nur Bossmann (2007) als Zwangsbedingungen. An anderer Stelle werden lediglich Zwischengruppen in der Baustruktur eines Produkts verwendet. Dies erschwert jedoch eine konsistente Modellierung mit unikalen Bauteilinstanzen. Das Sprachkonzept SysML (OMG 2017) bietet viele Möglichkeiten zur strukturellen Modellierung von Zusammenhängen und Einschränkung dieser im Rahmen von Baukastensystemen. Weiter existieren geeignete Schnittstellen für den Import und Export domänenspezifischer Informationen wie z. B. einer Prozessvorrangmatrix als einfache CSV-Tabelle. Diese Möglichkeiten gilt es im Kontext der spezifischen Anforderungen einer modellbasierten Produktionssystemplanung zu elaborieren.

Um basierend auf den Einschränkungen des Vorranggraphen die Zuordnung von Aufgaben zu Stationen durchzuführen, existiert im vorliegenden Stand der Forschung eine Vielzahl von Ansätzen zur **Optimierung von Produktionssystemen**. Das in der Fachliteratur bei der Neuplanung als ALBP bezeichnete Problem wird charakterisiert durch die gewählte Zielfunktion [C2] und zugehörigen Nebenbedingungen. Letztere werden maßgeblich durch das AL-Design [C3] und die modellierten Eigenschaften der Prozessschritte beeinflusst. Die Analyse zeigt, dass keine Forschungsarbeit eine ausreichend detaillierte Abbildung der hier vorliegenden realen Problemstellung im Sinne der Kombination [multikriterielle Zielfunktion + *multi-manned* Stationen + parallele Stationen + verschiedene Stationstypen + Teilbarkeit der Aufgaben] vornimmt. Viele Arbeiten optimieren die Zuordnung hinsichtlich einer Kostenfunktion. Eine multikriterielle Optimierung geht in der Literatur meist mit der Betrachtung eines fiktiven oder Benchmark Datensatzes einher. Lediglich Chen & Cheng et al. (2018) optimieren ein reales Beispiel [C1] hinsichtlich mehrerer Zielgrößen. Bezogen auf das AL-Design [C3] ist die Arbeit von Michels & Lopes et al. (2018) hervorzuheben: Hier können mehrere Roboter gleichzeitig am Werkstück arbeiten (*multi-manned*) und die Stationen besitzen neben einem Parallelitätsfaktor auch equipmentabhängige Bearbeitungs- und Handhabungszeiten. Auf ein Scheduling zur stationsinternen Einhaltung der Vorrangbeziehungen wird aufgrund der Anwendung zum Punktschweißen im automobilen Karosseriebau jedoch verzichtet. Die Berücksichtigung der Teilbarkeit von Prozessschritten [C4] (z. B. für Schweißnähte) durch eine nicht-diskrete Zuordnung der Aufgaben zu Stationen findet in der Literatur generell nicht statt. Die analysierten Ansätze verwenden sowohl exakte als auch heuristische Lösungsverfahren [C5]. Das zeigt, dass das ALBP sehr komplex (*NP-schwer*) ist, durch die Fortschritte in der Solver-Entwicklung eine exakte Lösung von Problemen dieser Größenordnung jedoch realistisch ist (Boysen & Schulze et al. 2022).

Um die Akzeptanz der Lösung zu steigern und nachfolgenden Planungsaktivitäten das Zwischenergebnis in einem digitalen Modell zu übergeben, wird ein Blick auf Ansätze zur **mo-**

dularen Visualisierung und Simulation von Produktionssystemen geworfen. Eine zentrale Anforderung hierbei ist die Verwendung von Standardmodulen [D1] und einem modularen Baukasten [D2], um eine einfache automatische Initialisierung des Simulationsmodells [D3] mit vordefinierten Parametern zu ermöglichen. Im Bereich der Modularisierung existiert eine Vielzahl von Ansätzen. Hervorzuheben ist die Umsetzung des modularen Baukastens nach Kluge (2011), welche eine einfache funktionale Modellierung und Verkettung von Stationen ermöglicht. Die automatisierte 3D-Visualisierung und Simulation findet nur in Gönzheimer & Kimmig et al. (2019) und Lämmle & Seeber et al. (2020) statt. Lämmle & Seeber et al. (2020) beschränkt sich jedoch auf einfache *pick and place* Operationen mit zwei Robotern und die Visualisierung mit PolyVR in Gönzheimer & Kimmig et al. (2019) beinhaltet ein schlüsselfertiges System, welches Simulationsstudien oder eine spätere Manipulation (z. B. im Rahmen einer Detail-Layoutplanung) ausschließt.

Dieses Defizit im vorliegenden Stand der Forschung wird in Abbildung A1.1 in Anhang A1 visualisiert. Hier werden die analysierten Forschungsarbeiten entlang der Aufgaben der assistierten Produktionssystemplanung gemäß ihres Detailgrads in der Abbildung des jeweiligen Sachverhalts eingeordnet. Es wird ersichtlich, dass ein ganzheitlicher Ansatz zur assistierten Planung von optimalen Produktionssystemen basierend auf Produktdaten nicht vorliegt. Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, diese Forschungslücke zu schließen.

Vor dem Hintergrund der Zielstellung aus Kapitel 1.3 und diesem Forschungsdefizit ergeben sich die folgenden, offenen *Forschungsfragen* (FF):

FF1 Welche Repräsentation und welcher Lösungsansatz eignet sich, um Ähnlichkeiten zwischen produzierten und angefragten Produktvarianten bei der Produktionssystemplanung zu nutzen?

FF2 Wie kann ein betriebsmittelunabhängiger Prozessvorranggraph basierend auf Produktinformationen inkl. der Berücksichtigung von nicht explizit vorhandenen Metadaten und personengebundenem Erfahrungswissen erstellt werden?

FF3 Wie kann unter Einhaltung der Vorrangbeziehungen ein hinsichtlich mehrerer Zielkriterien optimales Produktionssystem bestimmt werden?

FF4 Wie kann das Planungsergebnis für nachfolgende Planungsschritte über zuvor festgelegte Parameter mit einem digitalen Modell modular visualisiert und simuliert werden?

Der im folgenden Kapitel 4 vorgestellte eigene Ansatz hat die Beantwortung dieser vier forschungsleitenden Fragestellungen zum Ziel.

4 Eigener Ansatz

In diesem Kapitel 4 wird die entwickelte **Methode zur assistierten Produktionssystemplanung** vorgestellt. Die betrachtete Planungsaufgabe umfasst dabei den Rahmen der variantenspezifischen, idealen Grobplanung und basiert folglich auf den zu diesem Zeitpunkt der Kundenanfrage zur Verfügung stehenden Produktinformationen (Abbildung 4.1 Input). Ergebnis des eigenen Ansatzes ist ein multikriteriell optimiertes Produktionssystem und dessen digitales Modell (Abbildung 4.1 Output) zur Verwendung in weiteren Planungsphasen.

Nach VDI 2223 (2004) ist eine *Methode* definiert als „*planmäßiges Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Ziels.*“ Das Ziel der hier vorgestellten Methode ist die Optimierung des Produktionssystems, wobei die in Kapitel 3.1 vorgestellten Anforderungen an den Lösungsansatz berücksichtigt und die in Kapitel 3.3 abgeleitete Forschungslücke adressiert werden sollen. Hierzu beantwortet der Ansatz die vier vorgestellten Forschungsfragen und gliedert sich analog in vier Teilschritte. Das ganzheitliche Vorgehen ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

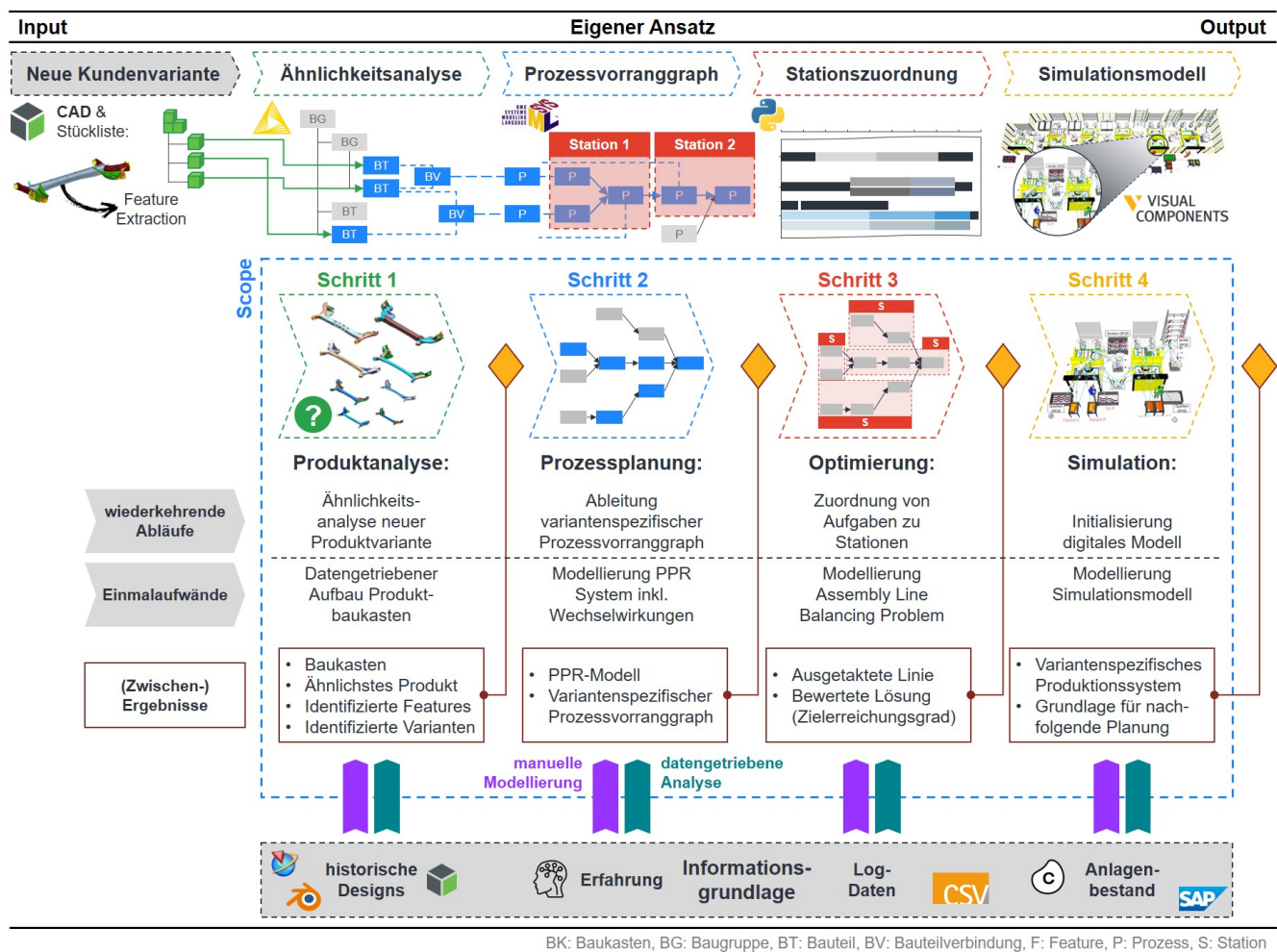


Abbildung 4.1: Methode zur assistierten Produktionssystemplanung (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer & Tse et al. 2025).

In einem **ersten Schritt** werden die vorliegenden Produktdaten mit dem Ziel der Identifikation der herzustellenden Features und Verbindungselemente analysiert. Hierzu verwendet der Ansatz Ähnlichkeiten zu bereits produzierten Produkten. Abhängig von den vorliegenden Produktdaten werden verschiedene Lösungsverfahren zur Ähnlichkeitsanalyse vorgestellt, um *FF1* zu beantworten. Weiter wird darauf eingegangen, wie bei einem Mangel an Trainingsdaten synthetische Daten erzeugt und eingesetzt werden können. Darauf aufbauend wird in einem **zweiten Schritt** der Zusammenhang zwischen Produkt, Prozess und Produktionssystem inkl. Metadaten und Erfahrungswissen modelliert. Das dient dazu, um basierend auf den zuvor identifizierten Produktfeatures die notwendigen Produktionsprozesse und deren Abfolgerestriktionen abzuleiten. Im Sinne von *FF2* resultiert damit ein variantenspezifischer, betriebsmittelunabhängiger Prozessvorranggraph. Hierzu wird eine Ontologie für PPR Systeme entworfen, die Modellstruktur erläutert und diskutiert, wie der Aufwand bei der manuellen Modellierung der Zusammenhänge zwischen Produkt, Prozess und Produktionssystem reduziert werden kann.

Zentral für den eigenen Ansatz ist der **dritte Schritt**, der entsprechend *FF3* adressiert: Hier werden die nun vorliegenden Prozessschritte unter Einhaltung der Vorrangbeziehungen zu Stationen zugeordnet. Bei dieser betriebsmittelbezogenen Optimierung werden mehrere Zielkriterien berücksichtigt. Das mathematische Problem wird im Sinne des *Assembly Line Balancing* (ALB) charakterisiert, vorgestellt und erläutert.

Im **letzten Schritt** wird basierend auf dem optimierten System ein digitales (Simulations-) Modell erzeugt. Die Methode schlägt hierbei basierend auf verschiedenen Anwendungsfällen eine geeignete Modularisierung des Systems vor und beantwortet so *FF4*.

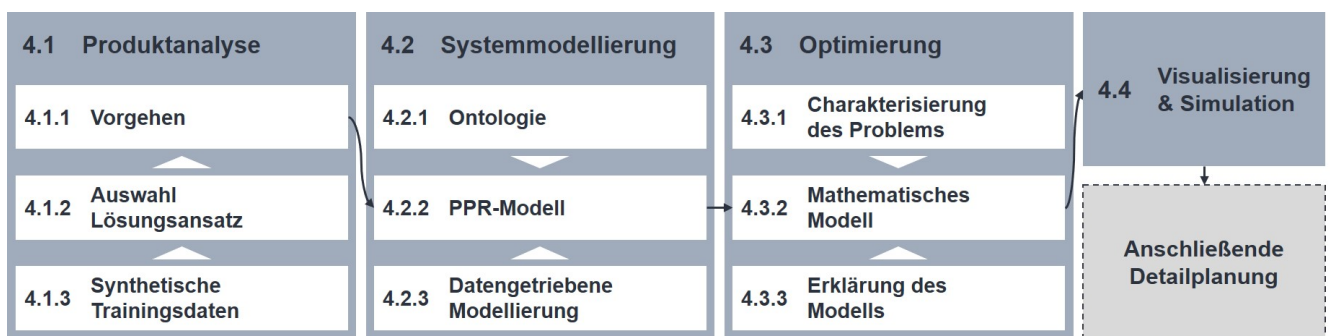


Abbildung 4.2: Struktur des eigenen Ansatzes in Kapitel 4 (eigene Darstellung).

Dieses Kapitel 4 ist analog zu den vier Schritten der vorgestellten Methode aufgebaut und folgt den Teilaufgaben der assistierten Produktionssystemplanung vom Produkt hin zum Produktionssystem. Die einzelnen Teilkapitel adressieren entsprechend im Detail den jeweils betrachteten Input sowie die generierten (Zwischen-) Ergebnisse, die als Output vorliegen. Hierbei strebt die vorgestellte Methode eine allgemeine Anwendbarkeit an, setzt durch die in Kapitel 3.1 diskutierten Anforderungen jedoch einen Fokus auf die frühe Phase der Pro-

duktionsplanung sowie die Betrachtung von Fügeaufgaben. Im Folgenden wird an einzelnen Stellen darauf eingegangen, wie mit den spezifischen Herausforderungen einer begrenzten Verfügbarkeit von (Meta-) Informationen umgegangen wird. Die resultierende Struktur des eigenen Ansatzes kann Abbildung 4.2 entnommen werden.

Im Folgenden unterscheidet jedes Teilkapitel auf einer übergeordneten Ebene zwischen den wiederkehrenden Abläufen der variantenspezifischen Produktionssystemplanung (in der jeweiligen Abbildung *oben* dargestellt) und den hierfür durchzuführenden Einmalaufwänden (analog jeweils *unten* dargestellt). Es ist anzumerken, dass die im Rahmen der initial durchzuführenden Modellierungsaktivitäten erzeugten Modelle bei einer langfristigen Nutzung des vorgeschlagenen Ansatzes entsprechend um die PPR-Informationen der neu produzierten Varianten laufend ergänzt werden müssen.

4.1 Produktanalyse zur Prozessplanung

Den ersten Schritt der Produktionssystemplanung stellt die Analyse der vorliegenden Produktinformationen dar. Diese werden im betrachteten Fall der variantenspezifischen Planung vom Kunden zur Verfügung gestellt. Der Produktentwurf ist zwar zum vorliegenden Zeitpunkt meist von zukünftigen Änderungen behaftet (Hagemann 2022), enthält jedoch im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit keine Freiheitsgrade zur Anpassung durch den Zulieferer. Bei der manuellen Analyse ist das Fachwissen bspw. über die verschiedenen Varianten eines funktionalen Bauteils oft personengebunden (Fleischer 2019) und Ähnlichkeiten zu bereits produzierten Produktvarianten werden mangels konsequenter Dokumentation und Transparenz nicht systematisch wiederverwendet (Lupinetti & Chiang et al. 2017). Das motiviert die rechnergestützte Analyse der Ähnlichkeit von Produkten als ersten Schritt der Methode.

Hierzu werden die zum Zeitpunkt der Grobplanung vorhandenen Produktdaten als **Input** betrachtet. Es handelt sich neben Auftragsinformationen wie z. B. dem geplanten Produktionsvolumen meist um CAD-Dateien und Stücklisten der spezifisch angefragten Kundenvariante (Hagemann 2022). Weiter liegen diese Informationen über alle in der Vergangenheit bereits produzierten Produktvarianten vor. Der angestrebte **Output** dieses Teilschritts umfasst:

- I Den datengetriebenen Aufbau eines Produktbaukastens: Dieser umfasst die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der bisher produzierten Produkt- und Bauteilvarianten und dient als Grundlage für das Produktmodell im nachfolgenden Kapitel 4.2.
- II Die Identifikation und Extraktion der zu produzierenden Features: Dieses Zwischenergebnis ist für die nachfolgenden Planungsschritte relevant. Die zu produzierenden Features definieren die notwendigen Produktionsprozesse.
- III Die Identifikation der ähnlichsten, bereits produzierten Produktvariante: Nach der Annahme *ähnliche Produkte werden meist ähnlich produziert* kann das dabei helfen einen

allerersten, sehr groben Überblick über eine mögliche Lösung und z. B. die Größenordnung der resultierenden Fertigungskosten zu erhalten.

- IV Die Klassifikation der vorliegenden Bauteile gemäß Baukasten: Für einige Bauteile existieren verschiedene Bauteilvarianten. Eine Zuordnung zum Baukasten identifiziert das Bauteil und dessen Variante. Diese hat Auswirkung auf die Notwendigkeit bestimmter Prozessschritte und die mögliche Fügestruktur.

Die vorgeschlagene Methode zur Überführung des Inputs in den Output orientiert sich an dem Grundvorgehen des sog. *Supervised Learning* und ist in Abbildung 4.3 visualisiert. Hierbei werden Zusammenhänge zwischen historischen Datenpunkten erlernt (Schritt 1), um diese bei der Klassifikation neuer Daten zu nutzen (Schritt 2) (Goodfellow & Bengio et al. 2016). Als Trainingsdatensatz können die bereits geplanten Produktvarianten gesehen werden. Neue Datenpunkte sind entsprechend die neu angefragten Kundenvarianten, für welche die vorgestellten Planungsschritte durchlaufen werden.

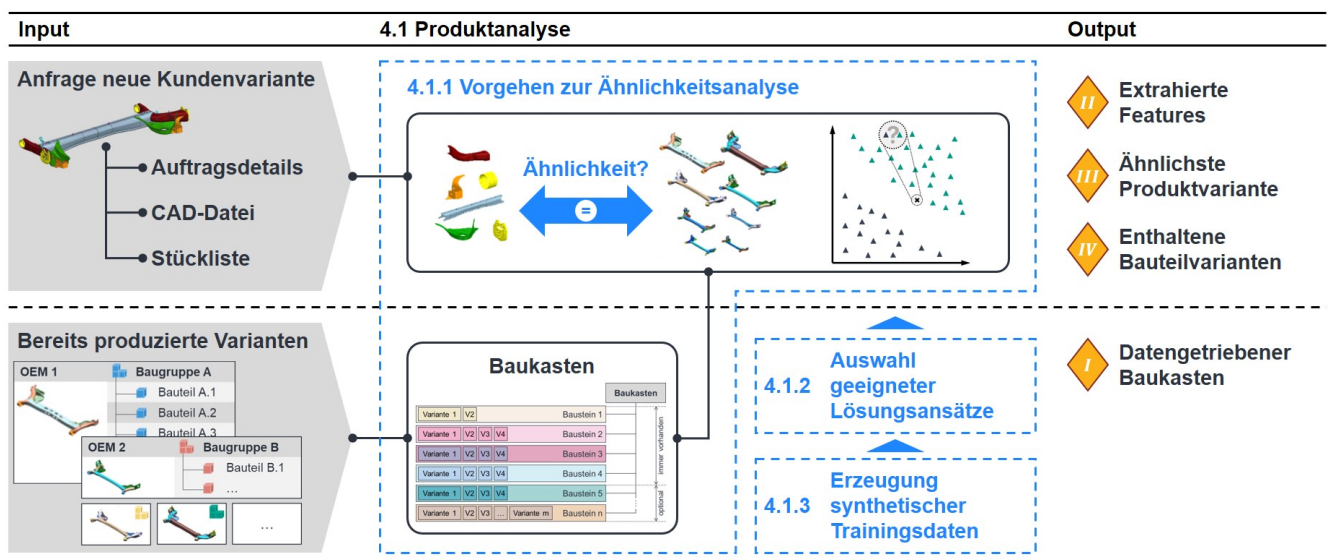


Abbildung 4.3: Allgemeines Vorgehen zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten (eigene Darstellung).

Das in Abbildung 4.3 dargestellte Vorgehen wird im folgenden Abschnitt 4.1.1 im Detail erläutert. Wie abhängig von bspw. den vorliegenden Daten geeignete Methoden zur Ähnlichkeitsanalyse ausgewählt werden können, wird in Abschnitt 4.1.2 beschrieben. Abschnitt 4.1.3 geht abschließend auf die Erzeugung synthetischer Trainingsdaten ein.

4.1.1 Vorgehen zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten

Schritt 1: Zuerst ist die Analyse der bereits produzierten Produkte einer Produktfamilie durchzuführen. Hierzu muss die Datenbasis kategorisiert und davon abhängig geeignete Merkmale zur Bestimmung der Ähnlichkeit von Produkten identifiziert werden. Es können

verschiedene Produktdaten wie z. B. Stücklisten oder CAD-Daten vorliegen. (vgl. Schäfer & Frank et al. 2022) Auf Unterschiede wird in Abschnitt 4.1.2 eingegangen. Hier wird das Vorgehen zunächst am Beispiel einfacher, geometribschreibender Produktmerkmale wie z. B. Länge, Breite, Höhe, Masse, Volumen etc. eines Bauteils vorgestellt, um das Konzept der *Ähnlichkeit* zu verdeutlichen.

Im Kontext des *Maschinellen Lernens* (ML) liegt bei der Analyse der vorliegenden Datenbasis historischer Produktdaten ein sog. *gelabelter* Datensatz vor. Das bedeutet, dass sowohl die Merkmale (z. B. Bauteilabmessungen) als auch die Klasse oder engl. *Label* (z. B. Bauteilart/-variante) bekannt sind. Das erlaubt die Extraktion vorhandener Zusammenhänge zwischen Merkmalen und Klassen. (vgl. Schäfer & Tremel et al. 2023) Diese Gemeinsamkeiten und Unterschiede der produzierten Produktvarianten ermöglichen die Identifikation von Merkmalen, die für die spätere Klassifikation neuer Produkte bzw. Bauteile geeignet sind. Hierzu werden die Produkte geclustert d. h. ähnliche Produkte zu einem Cluster zusammengefasst. Beim *k-means* Clustering wird für jeden Datenpunkt über die Berechnung des Abstands zwischen dem Datenpunkt und den *k* Clustermittelpunkten die Zugehörigkeit zu einem Cluster bestimmt. Die Koordinaten der Clustermittelpunkte werden anschließend dichtebasiert neu berechnet, bis das Vorgehen konvergiert oder ein Abbruchkriterium erreicht wird. (Goodfellow & Bengio et al. 2016) Die Ähnlichkeit zweier Produkte oder Bauteile wird hierbei folglich über die Distanz zwischen deren geometribschreibenden Merkmalen definiert. Abbildung 4.4 visualisiert den Vergleich eines Clusteringergebnisses (Symbole) mit der sog. *Ground Truth* d. h. den tatsächlichen Klassen (Farben) der Datenpunkte. Hier ist ersichtlich, dass die Merkmale „Länge“ und „Breite“ zur Isolation und damit der eindeutigen Klassifikation der roten Bauteilklasse besonders gut geeignet sind. Wiederum eignen sich diese beiden Merkmale nicht für eine fehlerfreie Trennung der grünen und blauen Bauteilklasse. Weiter erlaubt dieses Vorgehen den **datengetriebenen Aufbau eines Produktbaukastens** (vgl. Output *I*).

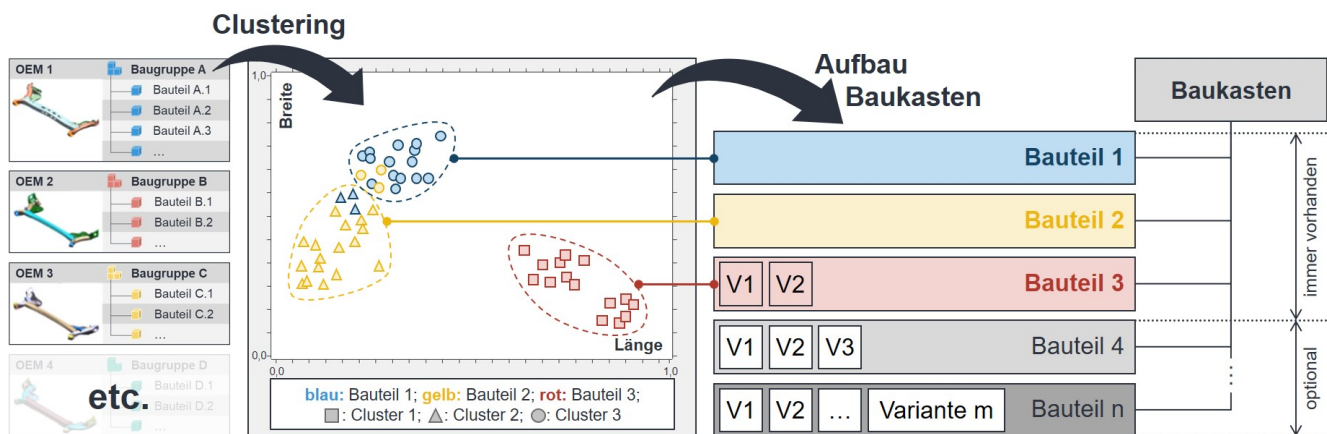


Abbildung 4.4: Clustering der Datenbasis und datengetriebener Aufbau eines Produktbaukastens (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer & Tremel et al. 2023).

Darunter wird verstanden, dass der Zusammenhang zwischen den bereits produzierten Produktvarianten und deren Merkmale in einem Referenzsystem gespeichert wird. Datenge-trieben meint dabei, dass durch die Analyse der Datenpunkte Cluster und damit ggf. neue Klassen identifiziert werden können. Ein Beispiel könnte sein, dass bei der Datenanaly-se auffällt, dass für die rote Bauteilklasse zwei Sub-Cluster existieren, die sich bzgl. des Bauteilgewichts unterscheiden. Das könnte im Zusammenhang mit unterschiedlichen Ferti-gungsverfahren stehen. Diese Wechselwirkungen sind für die nachfolgende Prozessplanung (siehe Kapitel 4.2) relevant. Ebenso relevant für die Ableitung der notwendigen Produkti-onsprozesse ist die Extraktion der **zu produzierenden Features** (vgl. Output *II*). Diese sind im Strukturbaum einer Baugruppe enthalten. Ein Feature (wörtlich übersetzt *Merkmal*) bezeichnet im Kontext dieser Arbeit Konstruktionselemente wie z. B. eine Bohrung, Fase oder Toleranzbemaßung und ist somit nicht dasselbe wie die zuvor erwähnten geometriebeschrei-benden Merkmale.

Schritt 2: Im Rahmen der bei jeder Kundenanfrage wiederkehrenden, variantenspezi-fischen Produktionssystemplanung werden nun Merkmale einer neu angefragten Produkt-variante auf Ähnlichkeiten zu bereits produzierten Produkten und Bauteilen untersucht. Im Allgemeinen gleicht die Idee einer Klassifikation der Daten und damit der Zuordnung der neuen Bauteile zum zuvor erzeugten Produktbaukasten. Je nach Detailgrad der Ähnlich-keitsanalyse ermöglicht das die Identifikation des **ähnlichsten Produkts** (vgl. Output *III*) oder gar der Identifikation der **spezifischen Variante der verbauten Bauteile** (vgl. Output *IV*). (vgl. Schäfer & Tremel et al. 2023) Im nachfolgenden Kapitel 4.1.2 werden abhängig vom angestrebten Detailgrad verschiedene Lösungsansätze vorgestellt. Für die Beschreibung des grundlegenden Vorgehens wird hier weiterhin die Ähnlichkeit zwischen Produkten bzw. Bau-teilen über deren Distanz bestimmt. Das Prinzip des sog. *nearest neighbor* (NN) verdeutlicht das (siehe Abbildung 4.5).

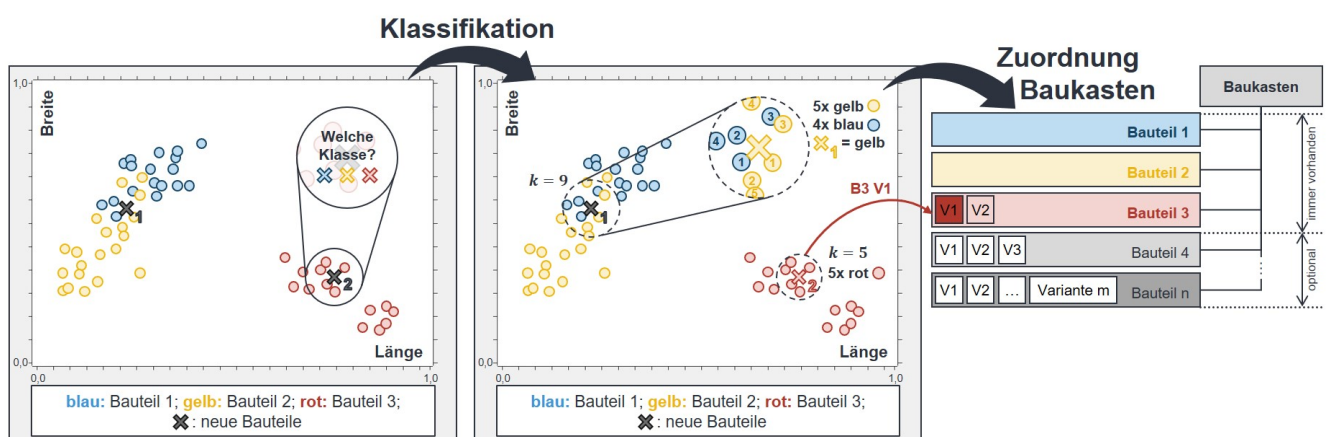


Abbildung 4.5: *k*-NN-Klassifikation neuer Datenpunkte und Zuordnung zum Produktbaukasten (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer & Tremel et al. 2023).

Bei der k NN-Klassifikation wird die Distanz des neuen Datenpunkts (X_1 und X_2) zu den vorliegenden Datenpunkten bestimmt. Die k nächsten Nachbarn bestimmen dann anhand ihrer Klasse über ein Mehrheitsvotum die Klasse des neuen Datenpunkts ($X_1 = \text{gelb}$ und $X_2 = \text{rot}$). (Goodfellow & Bengio et al. 2016) Der nächste Nachbar würde folglich das ähnlichste Produkt bzw. Bauteil repräsentieren. Hierzu können die im ersten Schritt als geeignet identifizierten Merkmale herangezogen werden. Es ist anzumerken, dass die Wahl des Distanzmaßes einen Einfluss auf das Klassifikationsergebnis hat. Weiter ist das dargestellte Vorgehen im Fall von zwei Dimensionen zwar eingängig, in der Realität erfordert eine ausreichend genaue Ähnlichkeitsbestimmung jedoch oft mehr Merkmale und damit komplexere Modelle. Das abstrakt vorgestellte Vorgehen ist allgemein anwendbar. Da ein Clustering bzw. eine Klassifikation geometriebeschreibender Merkmale in bestimmten Fällen nicht ausreichen, wird im folgenden Abschnitt auf weitere Lösungsansätze zur Ähnlichkeitsbestimmung eingegangen.

4.1.2 Auswahl geeigneter Ansätze zur Ähnlichkeitsanalyse

Die umfassende Literaturanalyse in Kapitel 3.2.2 zeigt, dass bereits einige Lösungsansätze zur Analyse von Ähnlichkeiten zwischen Produkten existieren. Je nach Datenbasis und Ziel der Ähnlichkeitsbestimmung sind diese jedoch nicht gleichermaßen geeignet. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt ausgehend von einer Charakterisierung des Anwendungsfalls verschiedene Lösungsansätze vorgestellt und beides in Zusammenhang gebracht.

4.1.2.1 Merkmale zur Charakterisierung von Anwendungsfall und Lösungsansatz

Zur Charakterisierung des Anwendungsfalls werden folgende vier Merkmale eingeführt. Diese werden analog verwendet, um die Lösungsansätze zu charakterisieren d. h. auszudrücken, ob ein bestimmter Ansatz die Eigenschaft besitzt, mit der spezifischen Merkmalsausprägung des Anwendungsfalls umzugehen.

Datenbasis: Zuerst ist eine Kategorisierung der Datenbasis erforderlich. An dieser Stelle beschränkt sich die vorliegende Arbeit auf CAD-Daten inkl. Stücklisten, wie sie zum betrachteten Zeitpunkt der Grobplanung vorliegen. Diese umfassen folglich eine Darstellung der Bauteilgeometrie sowie den Strukturbaum inkl. der verwendeten Konstruktionselemente und der festgelegten Bauteilbezeichner. Für die Charakterisierung der Datenbasis ist vor dem Hintergrund der Verwendung von ML-Verfahren vor allem die vorliegende Datenmenge relevant. Hierbei wird vereinfachend diskret zwischen **kleinen und großen** vorliegenden bzw. erforderlichen **Datensätzen** unterschieden.

Bauteilkategorie: Wie in Kapitel 2.2.1 erörtert existieren verschiedene Möglichkeiten zur 3D-Repräsentation von Bauteilen. Gängig sind die Festkörper-, Feature- und Oberflächen-Repräsentation sowie Punktwolken (Gezawa & Zhang et al. 2020). Die Lösungsansätze unterscheiden sich hinsichtlich der jeweils verwendeten Repräsentationsform. Diese

ist abhängig von der vorliegenden Bauteilkategorie, weshalb bei den vorliegenden Bauteilen zwischen **volumetrischen** (z. B. eine Welle) **und flächigen** (z. B. ein Blech) **Bauteilen** unterschieden wird.

Detailgrad: Das Ergebnis der Ähnlichkeitsanalyse wird maßgeblich durch den angestrebten Detailgrad der Aufgabe bestimmt. Was damit gemeint ist, verdeutlicht das Beispiel der Klassifikation eines Bauteils: Ein Bauteil durch die Ähnlichkeitsanalyse als solches (z. B. als Flansch) zu klassifizieren erfordert weniger Details als die spezifische Bauteilvariante (z. B. runder Getriebeflansch) zu identifizieren. Es wird zwischen einem **niedrigeren** (Bauteil) **und höherem** (Bauteilvariante) **Detailgrad** unterschieden.

Ziel: Zuletzt ist das Ziel der Aufgabe zu bestimmen. Das bedeutet, ob im Rahmen der Analyse **globale oder lokale Ähnlichkeiten** bestimmt werden sollen. Bei der zuvor erwähnten Bauteilklassifikation handelt es sich um eine globale Ähnlichkeitsanalyse. Die Analyse der lokalen Geometrie hingegen ermöglicht die Identifikation von Gemeinsamkeiten (wie z. B. die Kurve eines bestimmten Kantenverlaufs) über Bauteilklassen hinweg.

4.1.2.2 Vorstellung ausgewählter Lösungsansätze

Für alle im Folgenden vorgestellten Lösungsansätze gilt das im vorausgehenden Abschnitt 4.1.1 abstrakt beschriebene Grundvorgehen. Im ersten Schritt wird die vorliegende Datenbasis analysiert. Der zweite Schritt thematisiert die Analyse der Ähnlichkeit zwischen neu angefragter Kundenvariante und bereits produzierten Produktvarianten.

Manuelle Analyse

Die manuelle Analyse durch einen Experten stellt eine besonders flexible Möglichkeit dar. Hierbei kann ein nahezu beliebiger Input verarbeitet werden. Weiter entspricht die manuelle Produktanalyse dem in der industriellen Praxis aktuell wahrscheinlich meistverwendeten Vorgehen (Fleischer 2019). Ein erfahrener Planer analysiert dabei z. B. eine CAD-Baugruppe auf die verwendeten Bauteile und deren Varianten. Um bei der Planung wertvolle Zeit einzusparen, verwendet der Planer die *alte* Planung der Produktvariante, die der analysierten Datei *auf den ersten Blick am ähnlichsten* ist¹. Das erfordert viel Erfahrung, die in den meisten Fällen personengebunden ist (Deigendesch 2009). Um diesen Prozess zu verbessern, kann ein Produktbaukasten eingeführt werden. Mithilfe einer digitalen Checkliste (z. B. ein morphologischer Kasten vgl. Abbildung 2.10) kann der Planer systematisch die Ausprägung einzelner Merkmale ankreuzen und schließlich ähnliche Produkte identifizieren. Es verbleibt jedoch ein hoher, manueller Aufwand, was den Einsatz datengetriebener Ansätze motiviert.

¹ Ergebnis einer Befragung im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) öffentlich geförderten Verbundprojekts „Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems“ (MoSyS) vgl. Schäfer & Frank et al. (2022)

Semantische Analyse

Um die bereits erwähnte Identifikation der zu verbauenden Bauteile zu automatisieren, können linguistische Modelle eingesetzt werden (Schäfer & Frank et al. 2022). Basierend auf einer Liste aller Bauteilbezeichner (z. B. „Federteller“, „spring seat“ und „Federsitz“ als Bezeichner für das funktional gleiche Bauteil) können diese im ersten Schritt gemäß ihrer funktionalen Klasse in einem Referenzsystem gespeichert werden. Für den zweiten Schritt bleibt nur noch der Abgleich zwischen den bei der neuen Produktvariante verwendeten Bauteilnamen (z. B. „spring collar“) und dem Referenzsystem.

Der Ansatz nach Schuh & Rudolf et al. (2014) geht ähnlich vor und vergleicht Artikelnummern in Stücklisten hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit. Die Quantifizierung der Ähnlichkeit bleibt jedoch stark eingeschränkt, da lediglich das Vorhandensein eines Bauteils und nicht dessen geometrische Gestalt berücksichtigt wird. Bei unternehmensübergreifenden Prozessen wie z. B. der Konstruktion durch den Kunden und der Produktion durch den Zulieferer geraten diese Ansätze ebenfalls an ihre Grenzen.

Analyse geometriebeschreibender Merkmale

Um die geometrische Gestalt zu abstrahieren, eignen sich geometriebeschreibende Merkmale. Tabelle 4.1 zeigt eine Auswahl gängiger Deskriptoren. Diese Liste kann in bestimmten Fällen auch um aussagekräftige, extrahierte Features wie z. B. die Anzahl der Bohrungen pro Bauteil ergänzt werden. Der Prozess zur Ähnlichkeitsanalyse mit solchen Merkmalen wird bereits in Abschnitt 4.1.1 beschrieben und ist nicht auf die vorgestellten ML-Modelle k -means und k NN beschränkt. Um komplexere Zusammenhänge zwischen einer Vielzahl von Merkmalen abzubilden eignen sich unter anderem Entscheidungsbäume (engl. *Decision Tree*) oder neuronale Netze (z. B. engl. *Multi Layer Perceptron*).

Tabelle 4.1: Auswahl geometriebeschreibender Merkmale nach Schäfer & Tremel et al. (2023).

(Direkt extrahierte) Merkmale	[Einheit]	(Berechnete) Merkmale	Formel
Bounding-Box x -Achse	[mm]	Verhältnis	V/S
Bounding-Box y -Achse	[mm]	Dichte ρ	m/V
Bounding-Box z -Achse	[mm]	Kompaktheit	S^3/V^2
Volume V	[mm ³]	<i>Crinkliness</i>	$(S^3/V^2)^3$
Umhüllende Fläche S	[mm ²]		
Masse m	[kg]		

Da die Geometrie durch diese Merkmale lediglich abstrahiert wird, ist der Detailgrad der Ähnlichkeitsanalyse eingeschränkt. Es ist bspw. möglich, dass zwei Bauteile hinsichtlich ihrer Dimensionen ähnlich, aber in ihrer dreidimensionalen Gestalt sehr unterschiedlich sind.

Autoencoder zur Analyse von Punktwolken

Punktwolken können 3D-Bauteile hinreichend genau darstellen. Ihre Verarbeitung erfordert jedoch fortschrittliche Modelle. Ein Beispiel dafür sind sog. Autoencoder. Hierbei handelt es sich um eine spezielle Architektur von neuronalen Netzen. Sie besitzen die Eigenschaft, dass sie einen hochdimensionalen, komplexen Input (z. B. eine Punktwolke mit mehreren Tausend Punkten und jeweils drei Raumkoordinaten) ohne großen Informationsverlust in niedrigdimensionale, einfache Repräsentationen transformieren können. Abbildung 4.6 visualisiert dieses Vorgehen.

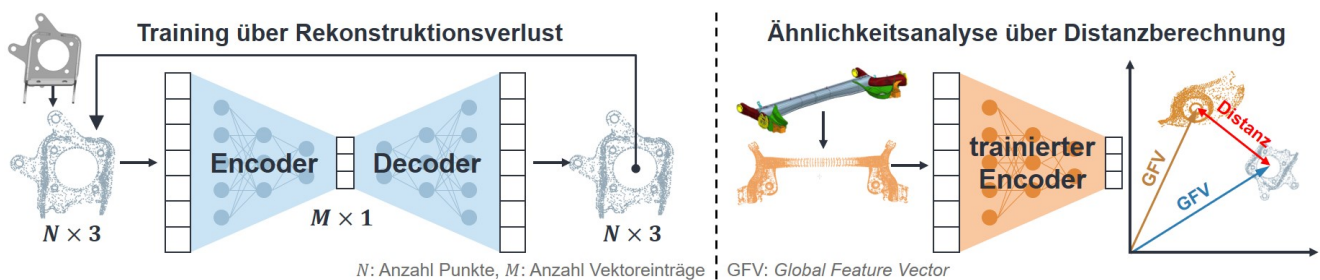


Abbildung 4.6: Ähnlichkeitsanalyse von Punktwolken mittels Autoencoder (eigene Darstellung in Anlehnung an Krahe 2023).

Im ersten Schritt wird der Autoencoder bzw. genauer der Encoder trainiert. Hierzu erzeugt der Encoder basierend auf dem Input d. h. den Punktwolken einen sog. latenten Vektor. Dieser dient wiederum als Input für den Decoder, welcher die Aufgabe besitzt, aus dem latenten Vektor die ursprüngliche Punktwolke zu rekonstruieren. Über den Trainingsverlauf hinweg werden die Gewichte der neuronalen Netze so angepasst, dass der durch den Decoder rekonstruierte Output möglichst exakt mit dem Input des Encoders übereinstimmt (Goodfellow & Bengio et al. 2016). Eine konvergierende Lernkurve sagt somit aus, dass der Encoder in der Lage ist auf Basis des Inputs eine hinreichend äquivalente, latente Darstellung (auch *Global Feature Vector* (GFV) genannt) zu erzeugen.

Der trainierte Encoder kann schließlich im zweiten Schritt dazu genutzt werden, den GFV neuer Produkte bzw. Bauteile zu erzeugen. Über die Berechnung des Abstands des Vektors zu anderen Vektoren können schließlich ähnliche Bauteile identifiziert werden. Auch hier hat die Wahl des Distanzmaßes einen großen Einfluss. Im latenten Raum liegen Distanzen jedoch keinen physikalischen Einheiten zugrunde (Arvanitidis & Hansen et al. 2018). Das schränkt die Interpretation der Distanzen und somit der Ähnlichkeit ein. Weiter erfordert der Ansatz die Verwendung von Punktwolken, was bei flächigen Bauteilen aufgrund deren geringer Bauteildicke teilweise keine hinreichend präzise Repräsentation der 3D-Geometrie darstellt.

Analyse lokaler Deskriptoren

Ein ebenso detaillierter Ansatz, der auf die Verwendung von Punktwolken verzichtet und damit besser für flächige Bauteile (Meshes oder STL) geeignet ist, wird in van Blokland & Theoharis (2021) vorgestellt und hier adaptiert. Das Vorgehen ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

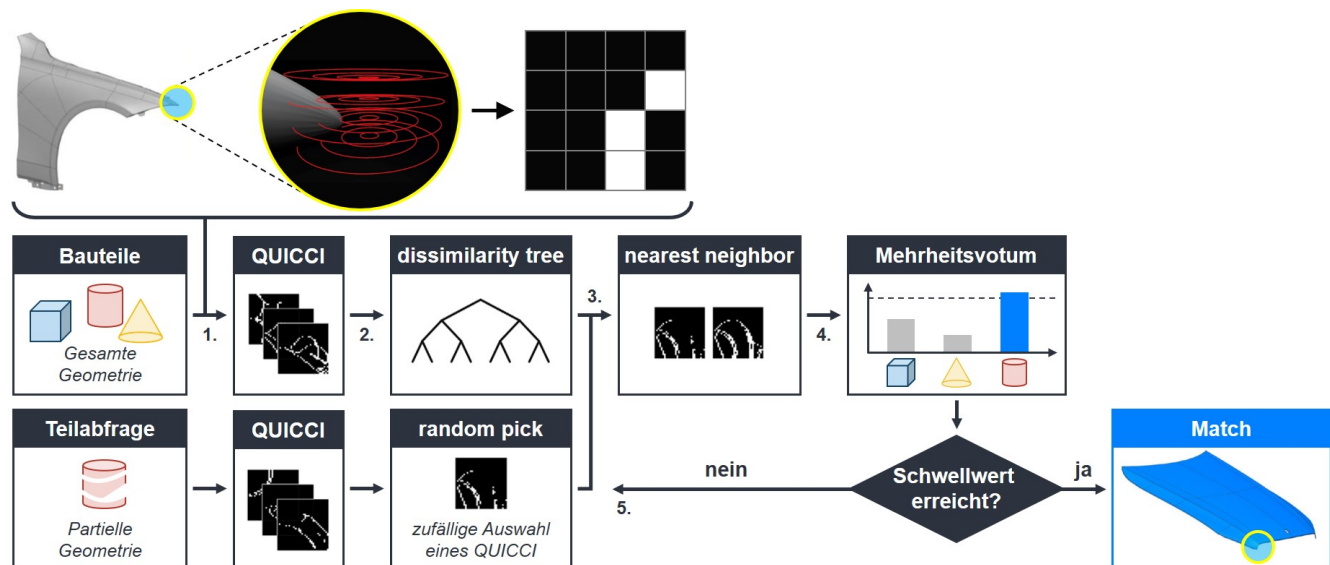


Abbildung 4.7: Ähnlichkeitsanalyse mittels QUICCI-Deskriptoren (eigene Darstellung in Anlehnung an van Blokland & Theoharis 2021; Bildquelle: Mercedes-Benz).

Hierbei wird ein lokaler Deskriptor für die Bauteilgeometrie erzeugt. Für jeden Punkt des Meshes eines Bauteils werden die Schnittpunkte des Bauteils mit einer Reihe von übereinanderliegenden, dreidimensionalen Kreisen berechnet. Die Änderung der Anzahl der Schnittpunkte über mehrere Ebenen wird in einer Binärwertmatrix gespeichert. Dieses sog. *Quick Intersection Count Change Image* (QUICCI) kann als Abstraktion der Silhouette der lokalen Topografie an dem entsprechenden Punkt interpretiert werden. (vgl. Abbildung 4.7 oben) Damit wird ein sog. *binary dissimilarity tree* erzeugt, der aufgrund der booleschen Darstellung des QUICCI eine besonders recheneffiziente Bestimmung des nächsten Nachbarn d. h. der lokal ähnlichsten Geometrie ermöglicht.

Das Vorgehen zur Identifikation ähnlicher Geometrien umfasst: (vgl. Abbildung 4.7 unten)

1. Erzeugung des QUICCI wie oben beschrieben
2. Mehrmalige Abfrage (engl. *query*) des dissimilarity tree
3. Identifikation nearest neighbor durch binären Vergleich der QUICCI
4. Mehrheitsvotum mit einer Stimme (engl. *vote*) je Abfrage: Bauteil mit den meisten Votes über alle Abfragen wird als lokal ähnlichste Geometrie identifiziert.
5. Wird ein definierter Schwellwert (min. Anzahl Votes) nicht erreicht, kann der Prozess mit einer partiellen Bauteilgeometrie wiederholt werden.

4.1.2.3 Auswahl geeigneter Lösungsansätze

Um die vorgestellten Lösungsansätze in Zusammenhang zu den charakterisierenden Merkmalen des Anwendungsfalls zu bringen, werden diese hinsichtlich ihrer erforderlichen Datenbasis und Bauteilkategorie sowie ihres Detailgrads einer lokalen oder globalen Ähnlichkeitsanalyse bewertet. Abbildung 4.8 fasst die Eigenschaften der Ansätze zusammen. Hierbei ist anzumerken, dass einzelne Merkmalsausprägungen sich nicht zwingend gegenseitig ausschließen. Das ist vom jeweiligen Kriterium bzw. Lösungsansatz abhängig.

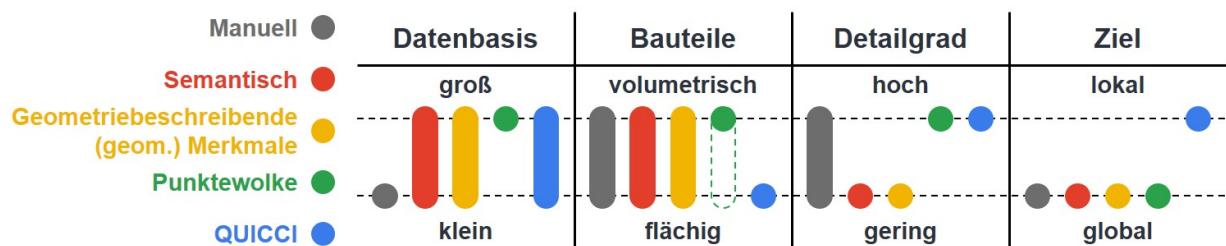


Abbildung 4.8: Einordnung der vorgestellten Lösungsansätze (eigene Darstellung).

Die **manuelle Analyse** durch einen erfahrenen Planer ist besonders flexibel und in der Lage jegliche Bauteile grob und detailliert zu klassifizieren. Aufgrund des hohen manuellen Aufwands ist sie jedoch ungeeignet für besonders große Datensätze. Weiter sind lokale Ähnlichkeiten über Bauteilklassen hinweg für den Menschen kaum bemerkbar. Die **semantische Analyse** funktioniert unabhängig von der vorliegenden Datenmenge und Bauteilkategorie, ist jedoch auf eine grobe, globale Ähnlichkeitsbestimmung beschränkt. Dasselbe gilt für **geometriebeschreibende Merkmale**. Je nach Merkmal eignet sich dieser Ansatz sowohl für flächige und volumetrische Körper. Ebenso reichen bei einfachen ML-Modellen bereits geringe Datenmengen. Große Datenmengen sind jedoch kein Problem, sondern ermöglichen die Verwendung komplexerer Modelle wie z. B. neuronale Netze. Allerdings ist sowohl die Identifikation spezifischer Varianten als auch eine lokale Ähnlichkeitsanalyse eingeschränkt. **Punktwolken und Autoencoder** eignen sich sehr gut für detaillierte, globale Analysen. Sie erfordern jedoch eine große Menge an Trainingsdaten. Der **QUICCI-Deskriptor** ist eine neuartige Möglichkeit der lokalen Ähnlichkeitsanalyse.

Abbildung 4.9 schlägt zur Beantwortung von *FF1* einen Entscheidungsbaum zur Auswahl geeigneter Lösungsansätze abhängig von der Charakterisierung des Anwendungsfalls vor. In bestimmten Fällen ist eine Kombination verschiedener Ansätze möglich und vorteilhaft. Da besonders ML-Verfahren mit einer großen Menge an Trainingsdaten robuster und besser performen oder diese gar voraussetzen, wird im Folgenden darauf eingegangen, wie im Falle einer kleinen, vorliegenden Datenbasis Abhilfe geschaffen werden kann.

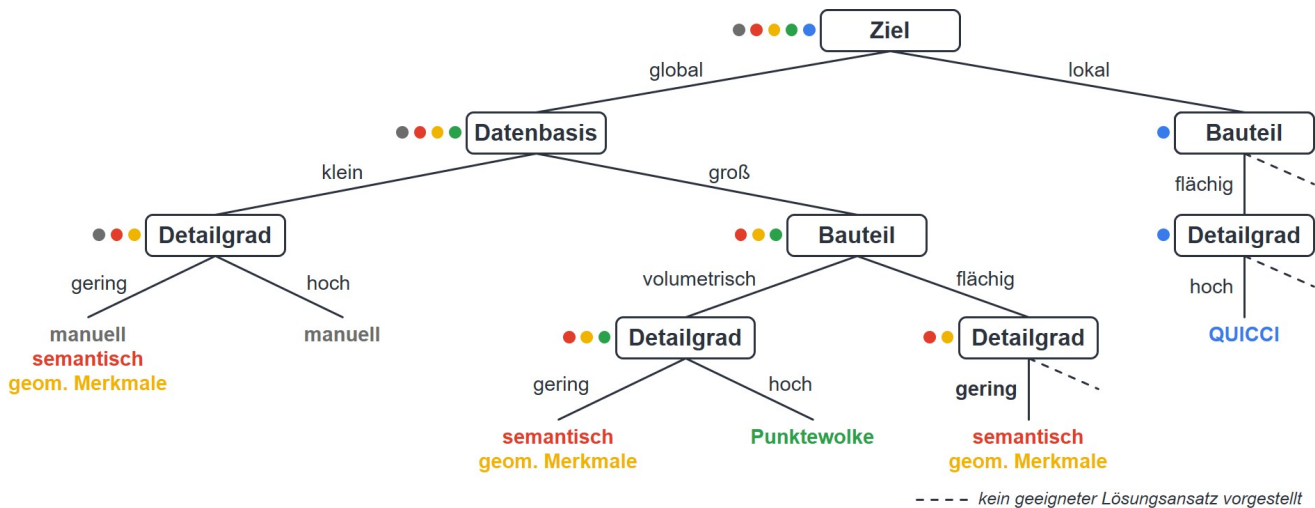


Abbildung 4.9: Auswahl geeigneter Lösungsansätze (eigene Darstellung).

4.1.3 Erzeugung synthetischer Trainingsdaten

In der Literatur zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten werden häufig große Benchmark Datensätze zum Training der ML-Algorithmen genutzt. Ein prominentes Beispiel dafür ist der *ShapeNet* Datensatz nach Chang & Funkhouser et al. (2015) mit 3D-Objekten aus dem Alltag. Liegen jedoch bei der industriellen Anwendung nicht ausreichend reale Daten vor, so können synthetische Trainingsdaten generiert werden. Hierbei werden basierend auf realen Daten systematisch neue Datenpunkte generiert. Einfache Formen der sog. *Data Augmentation* bei Bildern sind z. B. das Drehen und Spiegeln der Bilder. (Goodfellow & Bengio et al. 2016) Das reicht im Fall von 3D-Objekten jedoch nicht aus. Am Beispiel eines elektrischen Stellmotors wird im Folgenden kurz erläutert, wie ein kleiner Datensatz der 3D-Baugruppe synthetisch erweitert werden kann.

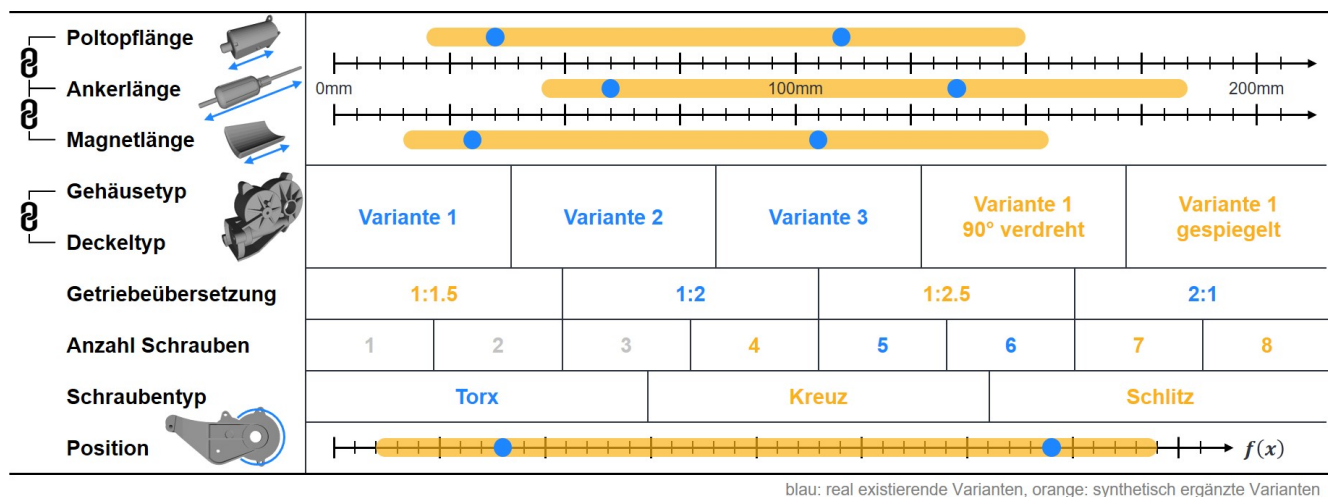


Abbildung 4.10: Freiheitsgrade des Elektromotors (eigene Darstellung).

Zunächst ist es notwendig die Bauteile und deren Varianten zu analysieren. Können verschiedene Bauteilvarianten (wie z. B. ein kurzer und ein langer Poltopf) kategorisiert werden (hier z. B. als „Poltopflänge“), so wird dies als **Freiheitsgrad** bezeichnet. Diese vorhandenen Freiheitsgrade d. h. die Unterschiede zwischen den Produktvarianten sind die Grundlage für den synthetisch erzeugten Datensatz. Sie werden genutzt, um entlang der geometrischen Beschreibung der Freiheitsgrade neue Varianten zu erzeugen. Dabei geht es nicht darum ausschließlich 100 % realistische Daten zu generieren, sondern das Training der ML-Algorithmen robuster und damit die Ähnlichkeitsanalyse zuverlässiger zu machen. Abbildung 4.10 verdeutlicht das Konzept. Der morphologische Kasten visualisiert die real existierenden Motorvarianten (*blau*) sowie die entlang der Freiheitsgrade diskret oder kontinuierlich, synthetisch ergänzten Varianten (*orange*). Durch eine Kombination der Merkmalsausprägungen lässt sich schnell eine große Menge repräsentativer Trainingsdaten generieren.

Die Arbeit im Carl-Zeiss-Stiftungsprojekt *AgiProbot* am wbk Institut für Produktionstechnik weist die Anwendbarkeit des Konzepts nach. Wu & Zhou et al. (2022) entwickelt ein Add-On für die *open source* CAD-Software Blender¹, das die automatische Generation von 3D-Motoren basierend auf den angegebenen Merkmalsausprägungen erlaubt. Abbildung 4.11 zeigt Beispiele für die Freiheitsgrade des Elektromotors sowie die graphische Benutzeroberfläche zur Eingabe.



Abbildung 4.11: Blender Add-On zur synthetischen Erzeugung von CAD-Objekten des Elektromotors (eigene Darstellung in Anlehnung an Wu & Zhou et al. 2022).

Die im Rahmen der Produktanalyse identifizierten Produktfeatures und Bauteilvarianten haben einen Einfluss auf die notwendigen Produktionsprozesse. Wie solche Zusammenhänge zwischen Produkt, Prozess und Produktionssystem formalisiert werden können, wird im folgenden Kapitel 4.2 erläutert.

¹ <https://www.blender.org/> (besucht am: 01.10.2024)

4.2 Systemmodellierung zur Ableitung des Prozessvorranggraphen

Dieses Kapitel beschreibt das Vorgehen zur Ableitung des Prozessvorranggraphen und verwendet hierfür die Ergebnisse der vorausgehenden Produktanalyse. Ein Prozessvorranggraph definiert die zur Herstellung notwendigen Produktionsprozesse sowie deren Abfolgerestrictitionen und Eigenschaften. Um die notwendigen Prozessschritte zu identifizieren, werden die zuvor extrahierten Features und identifizierten Bauteilvarianten verwendet. Diese Zusammenhänge zwischen Produkteigenschaften, notwendigen Produktionsprozessen und den Eigenschaften der Betriebsmittel werden zur Beantwortung von *FF2* in einem ganzheitlichen Systemmodell abgebildet. Abbildung 4.12 visualisiert die vorgeschlagene Methode.

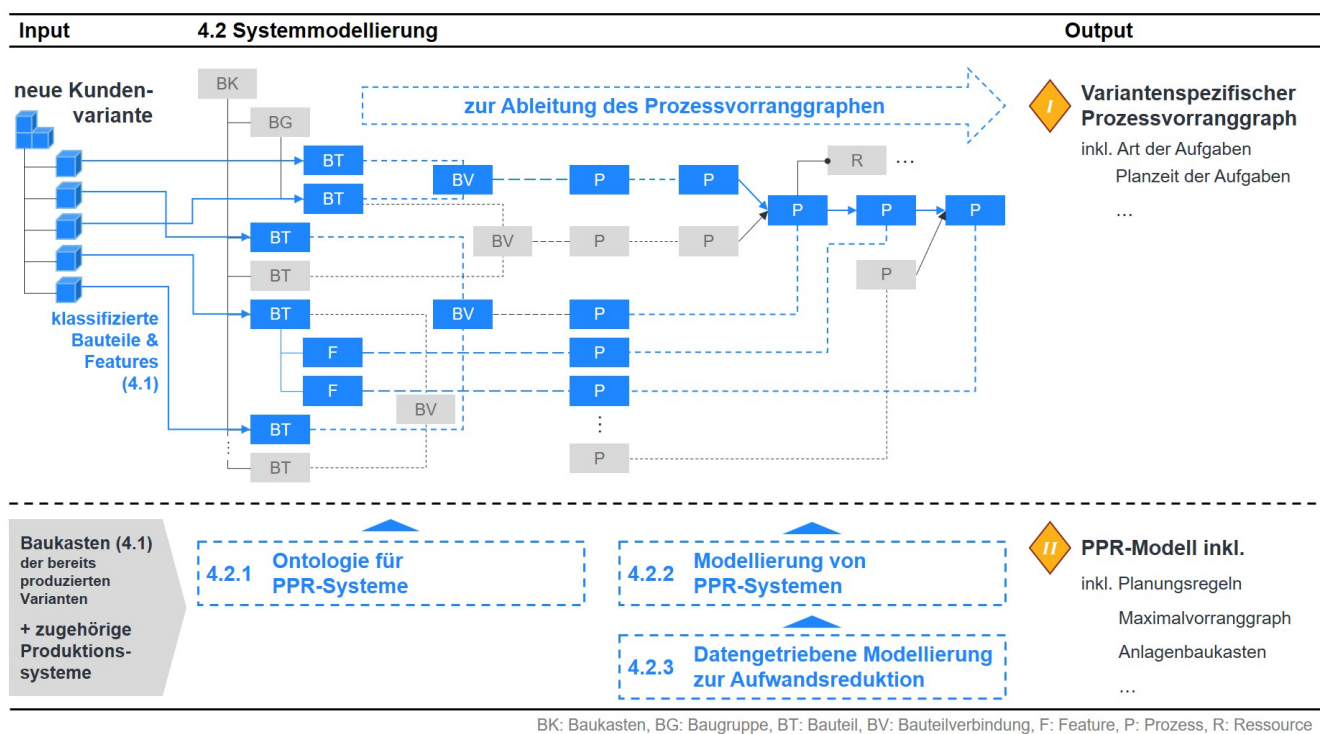


Abbildung 4.12: Vorgehen zur Ableitung des Prozessvorranggraphen (eigene Darstellung).

Ähnlich wie bei der Produktanalyse basiert das Systemmodell zunächst auf der Gesamtheit der bereits produzierten Produktvarianten (Baukasten aus Kapitel 4.1) und deren zugehörige Produktionssysteme. Um diese Informationen standardisiert zu formalisieren und das PPR-Gesamtsystem zu modellieren, benötigt es eine einheitliche Modellierungssprache und -struktur. Aus diesem Grund definiert Abschnitt 4.2.1 zunächst eine Ontologie für PPR-Systeme. Das Vorgehen zur Abbildung von Produkt-, Prozess- und Produktionssystemmodell sowie deren Wechselwirkungen wird in Abschnitt 4.2.2 beschrieben. Aus diesen Zusammenhängen (z. B. zwischen Produktfeatures und zugehörigen Produktionsprozessen oder Restriktionen zwischen Prozessschritten) ergibt sich schließlich ein sog. Maximalvorranggraph. Dieser umfasst alle für den Produktbaukasten bzw. die betrachtete Produktfamilie möglichen

Prozessschritte und deren Vorrangbeziehungen. Im Bezug auf die wiederkehrenden Aktivitäten der Produktionssystemplanung (Abbildung 4.12 *oben*) kann so basierend auf der ähnlichkeitsbasierten Klassifikation aus Kapitel 4.1 der variantenspezifische Prozessvorranggraph abgeleitet werden. Dieser stellt das zentrale Ergebnis (vgl. Output *I*) dieses Kapitels und die Grundlage der nachfolgenden Optimierung der Zuweisung von Prozessschritten zu Stationen (vgl. Kapitel 4.3) dar. Durch die Modellierung als Gesamtsystem berücksichtigt der Vorranggraph sog. Planungsregeln d. h. personengebundenen Erfahrungswissen in Form von PPR-Wechselwirkungen (vgl. *FF2*). Die Formalisierung solcher Planungsregeln als Modellzusammenhänge erfordert einen hohen manuellen Aufwand. Aus diesem Grund wird in Abschnitt 4.2.3 auf datengetriebene Ansätze zur Reduktion des manuellen Aufwands bei der Modellierung von Planzusammenhängen eingegangen. Das resultierende Systemmodell (vgl. Output *II*) ist als fachdisziplinübergreifende *single source of truth* im Sinne des *Model-Based Systems Engineering* (MBSE) gleichzeitig die Grundlage für die Optimierungs- und Simulationsmodelle der nachfolgenden Schritte.

4.2.1 Ontologie für PPR-Systeme

Wie in Kapitel 2.2.2 eingeführt, wird ein Systemmodell beim MBSE immer begleitet durch das Tripel Sprache, Methode und Werkzeug (Delligatti 2014). Letzteres ist unabhängig von der in diesem Abschnitt festgelegten Modellstruktur. Die *de facto* Standardsprache zur Systemmodellierung im MBSE ist die *Systems Modeling Language* (SysML), welche auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird. SysML ist ein modellbasiertes Sprachkonzept mit grafischer Notation und bietet eine Vielzahl verschiedener Diagrammtypen. Wie jede andere Modellierungssprache besteht die SysML aus verschiedenen Konstruktionselementen (Syntax) mit vordefinierter Bedeutung (Semantik). Die **Sprache** ist hierbei nicht zu verwechseln mit dem *Vokabular*, welches bei der Modellierung verwendet wird. Das wird im Rahmen einer sog. **Ontologie** festgelegt. In diesem Kapitel wird basierend auf den spezifischen Anforderungen der Schnittstelle zwischen Produkt und Produktion eine Ontologie für PPR-Systeme vorgestellt. Sie definiert die für den Wissensbereich der Modellierung notwendigen **Begriffe** sowie die **Beziehungen** zwischen den Begriffen (Gruber 1995).

Bei der Definition der zur Modellierung notwendigen Begriffe hat die vorliegende Arbeit zum Ziel, sich an der gängigen Terminologie der existierende Literatur im betrachteten Wissensbereich zu orientieren. Daher werden weiterhin die Klassen „Produkt“, „Prozess“ und „Ressource“ verwendet. Welche weiteren Klassen und Beziehungen die hier vorliegende Systemmodellierung zur Ableitung eines Prozessvorranggraphen erfordert, wird im Folgenden erläutert. Die Prozessplanung und damit der Prozessvorranggraph ist das Bindeglied zwischen Produkt- und Produktionssystem. Für einen einheitlichen Aufbau beider Seiten d. h. der Produkt- und Produktionsarchitektur eignet sich die in Kapitel 2.2.2 eingeführte, durch das

V-Modell der VDI 2206 (2002) weit verbreitete RFLP-**Methode**. Sie strukturiert ein System in Anforderungen (R von engl. *requirements*) und eine funktionale (F), logische (L) und physische (P) Ebene. Im Rahmen des vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung* (BMBF) öffentlich geförderten Verbundprojekts *Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems* (MoSyS) werden von insgesamt 18 Partnern folgende **Anforderungen** an eine Produkt-Produktions-Ontologie festgehalten: (Schäfer & Günther et al. 2023)

- A1** Die Ontologie muss einem einheitlichen Schema folgen. Das bedeutet, dass trotz der Schnittstelle zwischen Produkt und Produktion eine einheitliche Modellstruktur gewählt werden muss.
- A2** Die Ontologie muss eine (hierarchische) Produktstruktur abbilden. Hierbei ist wichtig, dass Produktfeatures nur in Zusammenhang mit einem oder mehreren strukturellen Elementen des Produkts (z. B. einem Bauteil) vorliegen können.¹
- A3** Die Ontologie muss eine Modellierung der Prozessreihenfolge ermöglichen. Dazu ist es notwendig, Prozesselemente in einer zeitlichen Abfolge zu modellieren und mit den zur Ausführung der Prozesse benötigten Ressourcen zu verbinden.
- A4** Die Ontologie muss Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktion darstellen können. Die Verknüpfung von produktseitigen Elementen mit produktionsseitigen Prozessen ist notwendig, um darzustellen welche Elemente mit welchen Features in einen Prozessschritt eingehen und dabei zu einem Output transformiert werden.

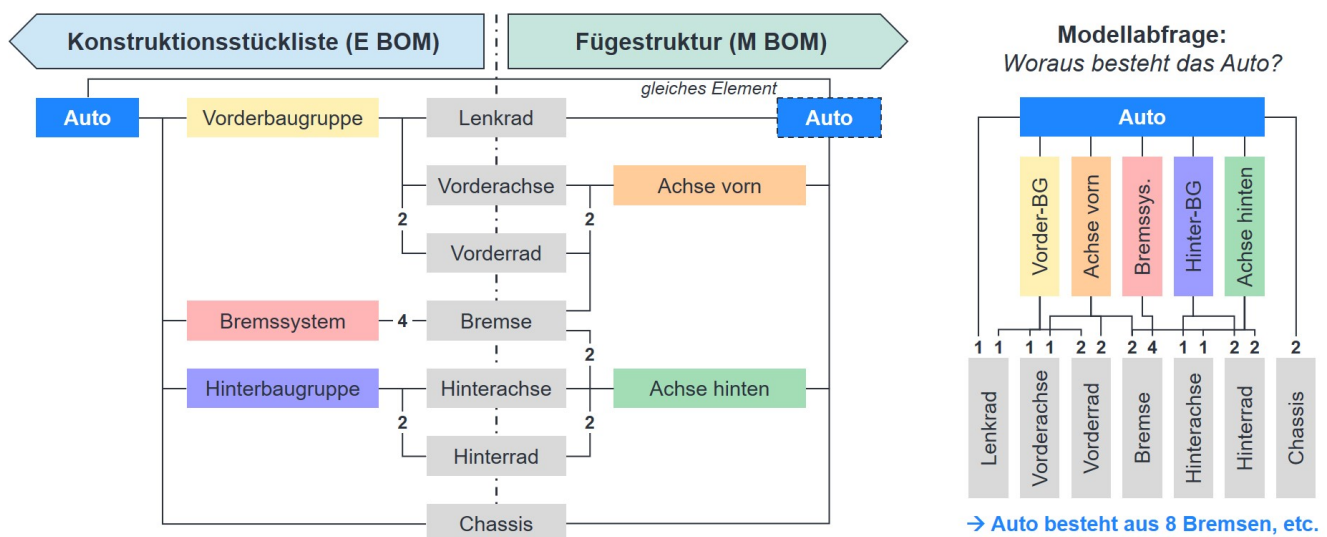


Abbildung 4.13: Problem einer inkonsistenten Modellierung von Produkt- und Fügestruktur (eigene Darstellung).

¹ Zur Definition: „Element“ wird als allgemeiner Begriff für ein Systemelement (i. A. Bestandteil eines Systems) verwendet. Ein Produktsystem besteht aus Elementen (z. B. Bauteilen) und Features. Ein „Feature“ wird immer durch einen Prozess hergestellt.

A5 Die Ontologie muss eine konsistente Modellierung (der Wechselwirkungen) sicherstellen. Die Modellierung der Wechselwirkungen dient der Abbildung von Erfahrungswissen und Planungsregeln als Zusammenhänge zwischen z. B. Produktfeature, dem notwendigen Produktionsprozess und der zugehörigen Ressource. Inkonsistenzen werden dabei vermieden, wenn das Modell mit unikalenen Bauteilinstanzen eine „Modellierung im Kreis“ verhindert (Martin & Schäfer et al. 2024). Änderungen eines Elements sollten im Modell nur an einer Stelle auftreten und sich von dort aus fortpflanzen. Wie Abbildung 4.13 zeigt, ist das eine zentrale Herausforderung bei der Verknüpfung von Produkt- und Fügestruktur.

Die in Schäfer & Günther et al. (2023) vorgestellte und in Abbildung 4.14 visualisierte Ontologie des MoSyS-Projekts berücksichtigt diese Anforderungen wie folgt:

Struktur (A1) Die Ontologie folgt einer Strukturierung nach den Ebenen der RFLP. Diese hat sich für Produktsysteme bereits etabliert und wird hier auf Produkt-Produktions-Systeme ausgeweitet. Das erlaubt eine einfache Integration des Produktionssystems, bei welchem auf funktionaler Ebene (F) die Produktionsprozesse stehen. Die Unterscheidung zwischen logischer und physischer Ebene wird in der Literatur viel diskutiert und ist hier wie folgt zu verstehen: Auf der logischen Ebene (L) werden die Ressourcen allgemein und unspezifisch z. B. als Schweißzelle modelliert. Die Klasse «physische Ressource» (P) hingegen bezieht sich auf eine bestimmte, einmal vorkommende (physische) Ressource. Diese haben somit bspw. spezifische Kapazitäten oder Fähigkeiten, die den produktseitigen Anforderungen entsprechen.

Produkt (A2) Für Produkte gilt dieselbe Struktur: Während ein «logisches Feature» eine allgemeine Bohrung oder Schweißnaht darstellt, bezieht sich ein «physisches Feature» auf ein Feature z. B. in einer Fertigungszeichnung, die weitere Details wie Toleranzen enthält. Weiter ist ein Feature immer an ein Element gebunden. Die Klasse «logisches Element» ist hierbei allgemein gewählt und kann für Bauteile oder Baugruppen stehen, sodass hierarchische Produktstrukturen flexibel abgebildet werden können.

Produktion (A3) Die in einem Prozessschritt realisierten Features werden dem «Prozess» als «logisches Feature» direkt allokiert. Darüber hinaus bilden das «logische Element» und/oder die «produktionsbezogene Baugruppe» den Input bzw. Output von Prozessen und erlauben so die Abbildung des zeitlichen Ablaufs. Auf der Produktionsseite werden Prozesse Ressourcen zugeordnet, die für die Ausführung notwendig sind.

Konsistenz der PPR-Zusammenhänge (A4/A5) Zur Vermeidung von Inkonsistenzen wird die «produktionsbezogene Baugruppe» eingeführt. Diese Klasse fasst Elemente und Features zusammen, die in einem Prozess realisiert werden. Um die Modellierung von „geschlossenen Kreisen“ (Martin & Schäfer et al. 2024) weiter auszuschließen,

verwendet die MoSyS-Ontologie nur relevante Allokationsbeziehungen. Um bspw. festzustellen welche «physischen (Produkt-) Elemente» auf einer «physischen Ressource» verarbeitet werden, führt der Weg über die «logische Ressource», den «Prozess», die «produktionsbezogene Baugruppe» sowie das «logische Element» (vgl. Abbildung 4.14). Wenn eine Beziehung in dieser Kette geändert wird, ändern sich automatisch die mit der «physischen Ressource» verbundenen «physischen Elemente». Eine direkte Allokation zwischen Produkt und Ressource (ohne den Prozess) wäre redundant, im Falle unvollständiger Modelländerungen (z. B. Löschen einer Beziehung zwischen Prozess und Ressource) inkonsistent und ist somit mit der vorgestellten Ontologie nicht möglich.

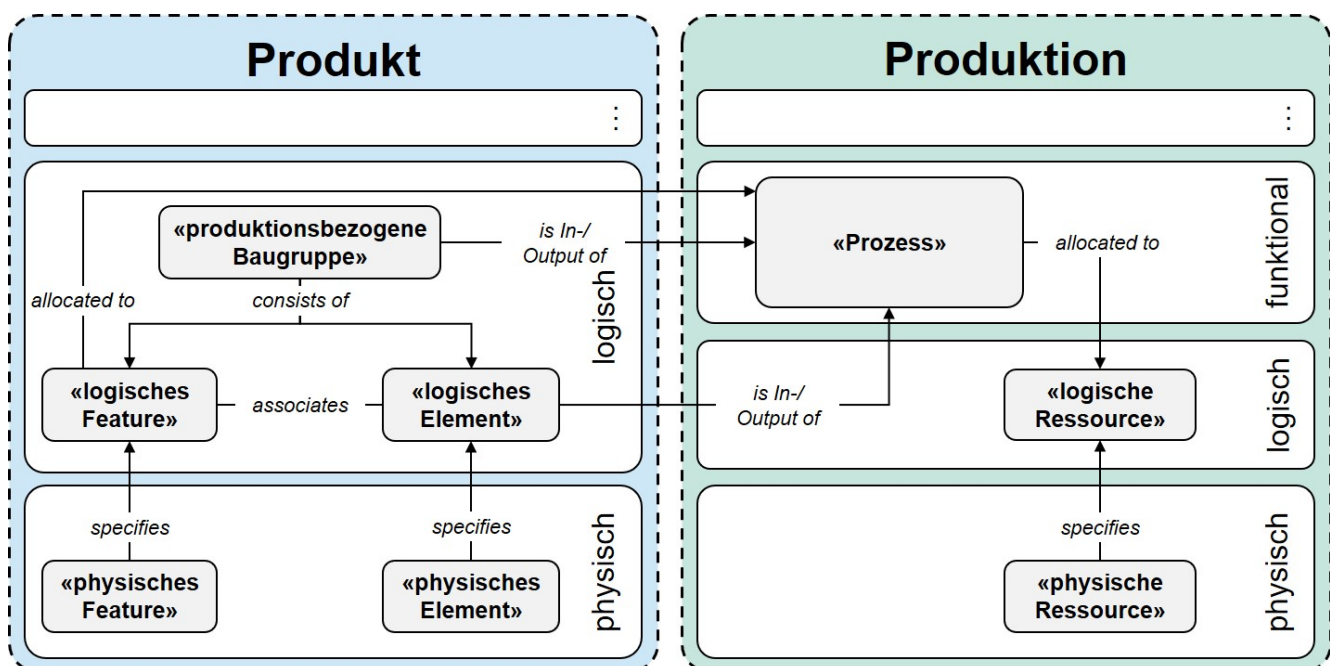


Abbildung 4.14: Relevanter Auszug aus der MoSyS-Ontologie für PPR-Systeme (eigene Darstellung nach Schäfer & Günther et al. 2023).

4.2.2 Modellierung von PPR-Systemen

Die im vorausgehenden Abschnitt vorgestellte Ontologie ist für den Bereich von PPR-Systemen allgemein anwendbar und unabhängig von einem spezifischen Anwendungsfall. Dieser Abschnitt knüpft hier an und stellt eine universelle Methode zur Modellierung von PPR-Systemen vor. Dabei ist folgende begriffliche Unterscheidung zwischen Modell und Referenzarchitektur hervorzuheben: In der Anwendung der Methode – wie sie in Kapitel 5.2 stattfindet – resultiert ein instanziiertes PPR-Modell. Bei der phasenweisen Beschreibung des Vorgehens in diesem Abschnitt 4.2.2 wird auf allgemein übertragbare Elemente eingegangen. Diese ergeben eine sog. Referenzarchitektur. Eine Referenzarchitektur umfasst die grundlegenden Eigenschaften eines Systems, realisiert durch seine **Klassen** und deren **Attribute** und **Beziehungen** sowie die Prinzipien seines Entwurfs und seiner Weiterentwicklung (ISO

42010 2022). Das Ergebnis ist flexibel erweiterbar und der Anwender hat die Möglichkeit, Elemente je nach spezifischer Problemstellung (Kapitel 5.2) zu detaillieren (vgl. Intra 2000). Die entwickelte Methode ist in Abbildung 4.15 als Phasen-Meilenstein-Diagramm dargestellt.

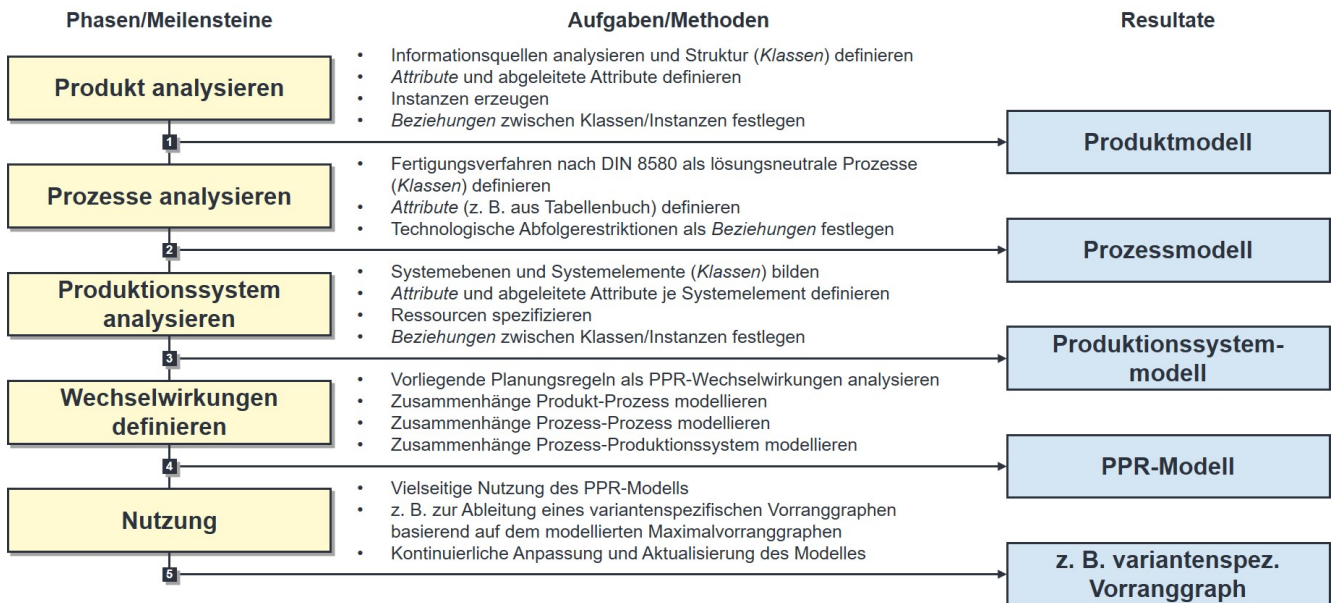


Abbildung 4.15: Methode für die Entwicklung von PPR-Systemen in Anlehnung an Schäfer & Günther et al. (2023) und A_Schenkel (2023)¹ (eigene Darstellung).

Im Folgenden werden die einzelnen Phasen kurz erläutert. Die Wahl von Modellierungssprache und -werkzeug beeinflusst die Möglichkeiten der Abbildung des Systemmodells und steht damit am Anfang. Diese Arbeit verzichtet auf einen Vergleich verschiedener Sprachen und nutzt für die folgenden Ausführungen den Quasi-Standard SysML. Eine Übersicht über die SysML Diagrammtypen wird in Kapitel 2.2.2 vorgestellt. Die gezeigten Modellausschnitte werden im No Magic Cameo Systems Modeler – kurz Cameo – implementiert.

Produktmodell

Basis für die Produktanalyse stellen weiterhin die zur Verfügung stehenden Informationen aus CAD-Dateien, Stücklisten und sonstigen Anforderungen dar. Der Fokus liegt dabei auf der Produktstruktur, d. h. der Identifikation relevanter Bestandteile und deren Relationen. Diese können schließlich in einem sog. *Block Definition Diagram* (BDD) definiert werden. Gemäß der MoSyS-Ontologie sind die zentralen **Klassen** (in Cameo mit SysML «stereotype» genannt) eines Produktmodells die Bauteile (i. A. Elemente) und Features. Im Hinblick auf das Ziel der Ableitung eines Prozessvorranggraphen sind für der Produktdarstellung besonders die Features von großer Bedeutung. Bereits Bihler (1999) führt verschiedene Feature-Arten ein, die in Tabelle 4.2 um das Verbindungs-Feature ergänzt werden.

¹ Verweise gemäß dem Schema (A_Name Jahr) beziehen sich auf studentische Arbeiten, die vom Verfasser der Dissertation angeleitet wurden.

Tabelle 4.2: Arten von Features nach Bihler (1999), ergänzt um das für diese Arbeit relevante Verbindungs-Feature.

Art	Beschreibung
Form-Feature	Beschreibt die Geometrie der Bauteile durch Formelemente (z. B. Punkt, Linie, Kreis).
Toleranz-Feature	Legen die erlaubten Fertigungstoleranzen gegenüber den spezifizierten geometrischen Abmessungen fest (z. B. Oberflächenrauheit).
Fertigungs-Feature	Beschreibt die Geometrie des zu fertigenden Teils, aufgeschlüsselt nach den Wahlmöglichkeiten der Herstellungstechnologie (z. B. Bohrung).
...	...
Verbindungs-Feature	Sind in CAD-Dateien oftmals nicht explizit enthalten, jedoch für das Fügen (Hauptgruppe 4 nach DIN 8580) besonders relevant (z. B. Schweißnaht).

Jede der dargestellten Feature-Arten kann weiter in Beispiele unterteilt werden, die sich wiederum mit unterschiedlichen Attributen (z. B. Radius) beschreiben lassen. Geeignete **Attribute** (in Cameo mit SysML «values» genannt) für Normteile oder Standard-Features werden verfügbaren Feature-Bibliotheken entnommen. Die für die Feature-Modellierung im Rahmen dieser Forschungsarbeit eingeführten Attribute werden aus der Feature-Bibliothek nach Eigner & Koch et al. (2017) verwendet oder basierend auf der Arbeit im Forschungsprojekt MoSyS individuell ergänzt. Ein Ausschnitt wird in Abbildung 4.16 gezeigt.

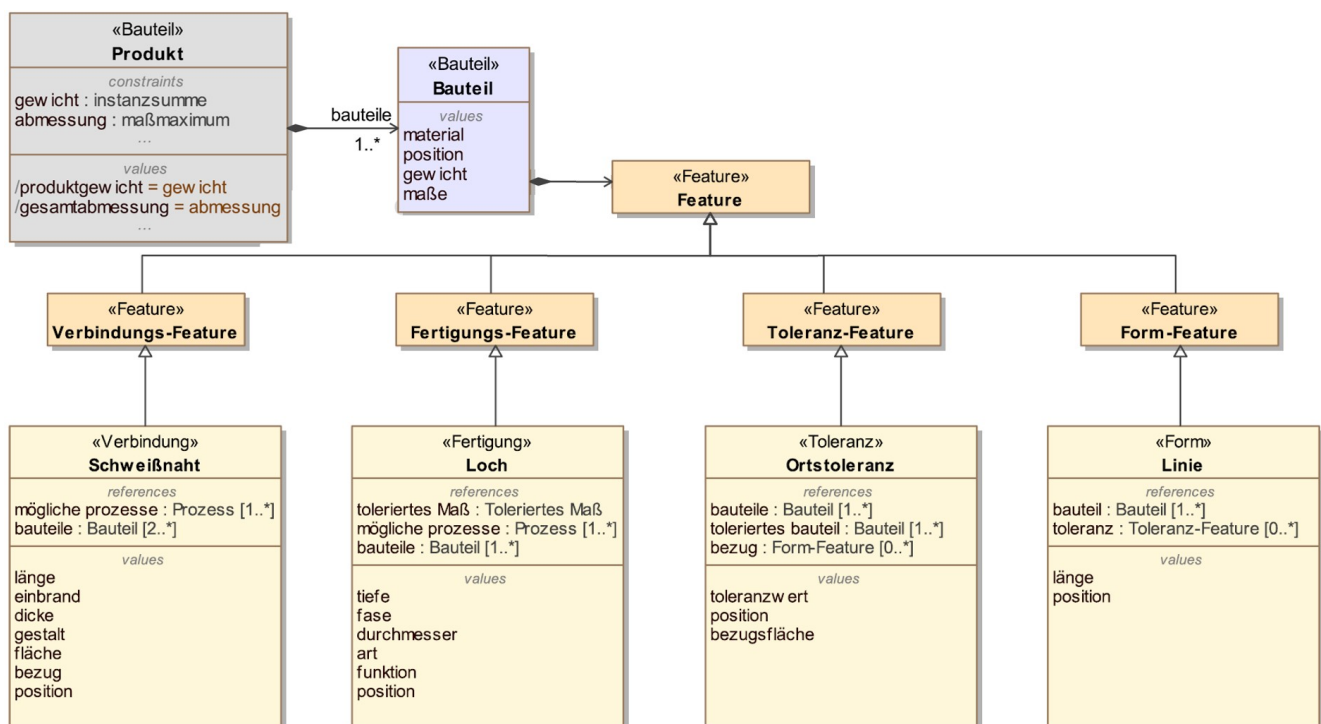


Abbildung 4.16: Attribut-Definition von Elementen und Features (eigene Darstellung).

Das Diagramm illustriert die Realisierung von Features in der Produktentwicklung. Es besteht aus folgenden Elementen:

- «Prozess» Prozess** (grün): Enthält die Ressource `Betriebsmittel [1]` (mit `references` und `values`), sowie die Attribute `w erkstoffe`, `geschw indigkeit`, `mögliche toleranz` und `prozessdauer`. Es ist mit `1..*` markiert.
- «Bauteil» Produkt** (grau): Enthält die Ressource `schw eißnähte : Schw eißnaht [1..*]` (mit `parts` und `values`), sowie die Attribute `/produktgew icht = gew icht`, `/gesamtschw eißnaht = nahtlaenge` und `/gesamtabmessung = abmessung`. Es ist mit `1..*` markiert.
- «Bauteil» Bauteil** (lila): Enthält die Attribute `maße`, `position`, `gew icht` und `material`. Es ist mit `1..*` markiert.
- «Feature» Feature** (gelb): Ein zentrales Element, das mit `0..*` markiert ist. Es wird durch eine **realisierte Feature** (schwarze Linie) mit dem Prozess und eine **feature** (blaue Linie) mit dem Produkt verbunden.
- «Feature» Verbindungs-Feature** (gelb): Enthält die Ressource `verbundene teile : Bauteil [2..*]` (mit `references` und `values`) und das Attribut `gestalt`. Es ist mit `1..*` markiert.
- «Feature» Fertigungs-Feature** (gelb): Enthält die Ressource `bauteil : Bauteil [1..*]` (mit `references`). Es ist mit `1..*` markiert.
- «Feature» Toleranz-Feature** (gelb): Ein leeres Feature-Element.
- «Feature» Form-Feature** (gelb): Enthält die Ressource `bauteil : Bauteil [1..*]` (mit `references`) und das Attribut `toleranz : Toleranz-Feature [0..*]`. Es ist mit `1..*` markiert.

Die Beziehungen sind wie folgt dargestellt:

- Der **Prozess** realisiert das **Feature** über die Ressource `Betriebsmittel`.
- Das **Produkt** realisiert das **Feature** über die Ressource `schw eißnähte`.
- Das **Produkt** ist mit dem **Bauteil** über die Ressource `schw eißnähte` verbunden.
- Die **Feature-Instanzen** (Verbindungs-Feature, Fertigungs-Feature, Toleranz-Feature, Form-Feature) sind über die Ressource `bauteil` mit dem **Bauteil** verbunden.

Zur Erzeugung eines konkreten Produktmodells wird das Produkt bestehend aus physischen Elementen und physischen Features spezifiziert. Die sog. Instanzen besitzen eine konkrete Ausprägung der in den Klassen definierten Attribute. Über bspw. eine *Design Structure Matrix* (DSM) werden die Instanzen der Elemente und Features untereinander in Beziehung zueinander gesetzt, wodurch sich die Baustruktur des Produkts abbilden lässt. Die Relationen basieren auf den Beziehungen zwischen den Klassen und umfassen neben der Aggregation z. B. auch die Kondition oder die topologische Relation (Bihler 1999). Letztere definiert eine physikalische Nähe zwischen Instanzen und eignet sich bspw. für Verbindungs-Features. Das Resultat dieser ersten Modellierungsphase ist ein instanziiertes Produkt- bzw. Produktbaukastenmodell. Dieses Modell enthält inkl. seiner Instanzen, deren Attribute und Beziehungen die Informationen über alle bereits produzierten Produktvarianten.

Die Modellierung der Prozesse orientiert sich an der DIN 8580 (2003). Die **Klassen** sind definiert durch die sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren. **Attribute** werden für eine lösungs- bzw. betriebsmittelneutrale Beschreibung der Prozesse verwendet. Das wird hier am Beispiel der Klasse «Schweißen» kurz verdeutlicht. Die zur Charakterisierung notwendigen Merkmale können Tabelle 4.3 entnommen werden. Weitere Prozesse (siehe Anhang A2) wie z. B. das Bohren (Tabelle A2.1) oder Fräsen (Tabelle A2.2) können äquivalent mit individuellen Attributen definiert werden.

Tabelle 4.3: Attribute zur Beschreibung des Schweißprozesses in Anlehnung an das Standardwerk „Tabellenbuch Metall“ nach Gomeringer & Kilgus et al. (2022).

Attribut	Einheit
Schweißspannung	[V]
Schweißstromstärke	[A]
Schweißgeschwindigkeit	[m/min]
Art der Schweißnaht nach DIN EN ISO 2553	[Strumpfstoß, T-Stoß, ...]
Art des Schutzgases	[Stoff]
Strömungsgeschwindigkeit des Gases	[l/mm]
Prozessdauer	[s]
Zusatzmaterial	[Werkstoff]
Zusatzmaterial Durchmesser	[mm]
Zusatzmaterial Geschwindigkeit	[cm/min]
Grundmaterial	[Werkstoff]

Für das Prozessmodell ergeben sich die in Abbildung 4.18 auszugsweise dargestellten Klassen und Attribute. Auf die **Beziehungen** zwischen Prozessen und Features sowie Prozessen und Ressourcen wird im Rahmen der Modellierung der PPR-Wechselwirkungen eingegangen. An dieser Stelle können jedoch allgemeine, technologische Abfolgerestriktionen zwischen Fertigungsverfahren modelliert werden (vgl. Fallböhmer 2000). Hierzu wird die gerichtete¹ Nachfolger-Beziehung zwischen zwei Prozessen eingeführt (siehe Abbildung 4.17 *links*).

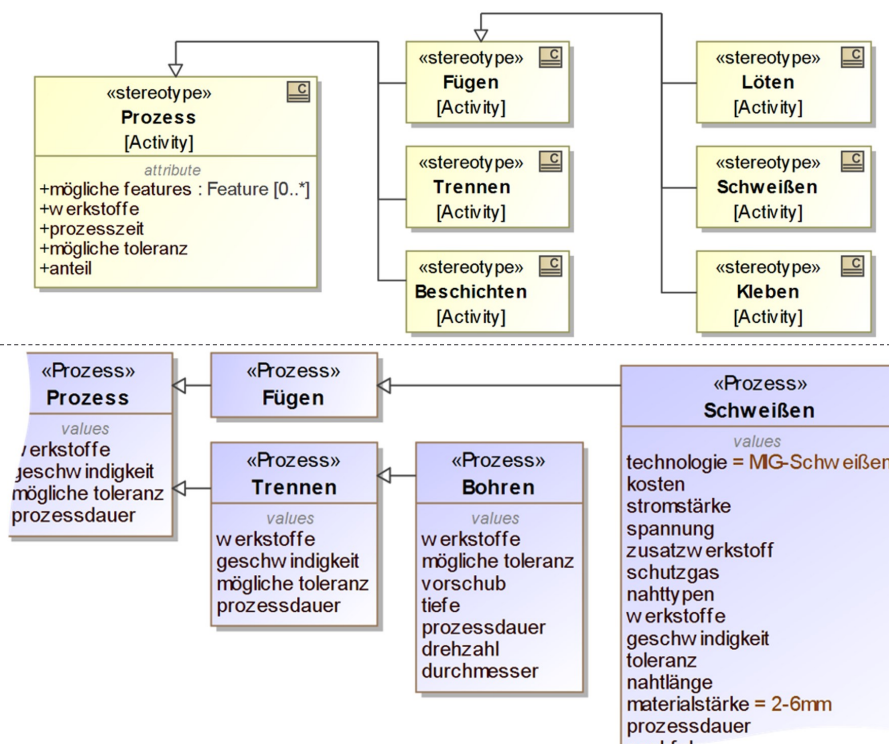


Abbildung 4.18: Auszug aus den Klassen nach DIN 8580 (oben) und den Attributen (unten) des Prozessmodells (eigene Darstellung).

¹ Gerichtet vom Vorgänger- zum Nachfolger-Prozess.

Produktionssystemmodell

Das generelle Vorgehen zur Analyse und Modellierung des Produktionssystems gleicht dem Vorgehen beim Produkt und wird hier kurz zusammengefasst. Ziel ist es, das Produktionssystem zunächst produktunabhängig zu modellieren. Diese Phase kann demnach trotz der vereinfacht sequentiellen Darstellung in Abbildung 4.15 parallel zur Produkt- und Prozessmodellierung stattfinden. Zunächst werden in einem BDD die (Ressourcen-) **Klassen** der relevanten Systemebenen definiert und in **Beziehung** zueinander gesetzt. Die vorliegende Arbeit fokussiert die Ebene der Produktionssysteme (vgl. Abbildung 2.1). Dabei wird ein modular, hierarchischer Aufbau mit einheitlichen Schnittstellen der Module gewählt. Durch eine einheitliche Struktur und Darstellung können so später Teilsysteme nach Funktionen kombiniert und ausgetauscht werden. Die zur Abbildung eines solchen Anlagen- bzw. Modulbaukastens verwendeten Klassen orientieren sich am Aufbau von MASON (Lemaignan & Siadat et al. 2006) und ProSyCo (Bauer 2014) und sind auszugsweise in Abbildung 4.19 dargestellt. Alle definierten Klassen werden weiter mit **Attributen** spezifiziert. Neben allgemeinen Informationen über bspw. den Arbeitsraum (Abmessungen, Platzbedarf etc.) oder das Wirkverhalten (Kapazitäten, Zeiten etc.) sind geeignete Attribute meist abhängig von den verwendeten Ressourcen (Gausemeier & Lanza et al. 2012). Neben verfügbaren Katalogen orientiert sich die vorliegende Beschreibung an Feldmann & Schmuck et al. (2008) und Eigner & Koch et al. (2017) und ergänzt diese um die für das Forschungsprojekt MoSyS erforderlichen Produktionselemente und deren Attribute. Ein Auszug der resultierenden Referenzarchitektur für Produktionssysteme kann Abbildung 4.19 (und aus Gründen der besseren Lesbarkeit zudem Abbildung A2.1 im Anhang) entnommen werden.

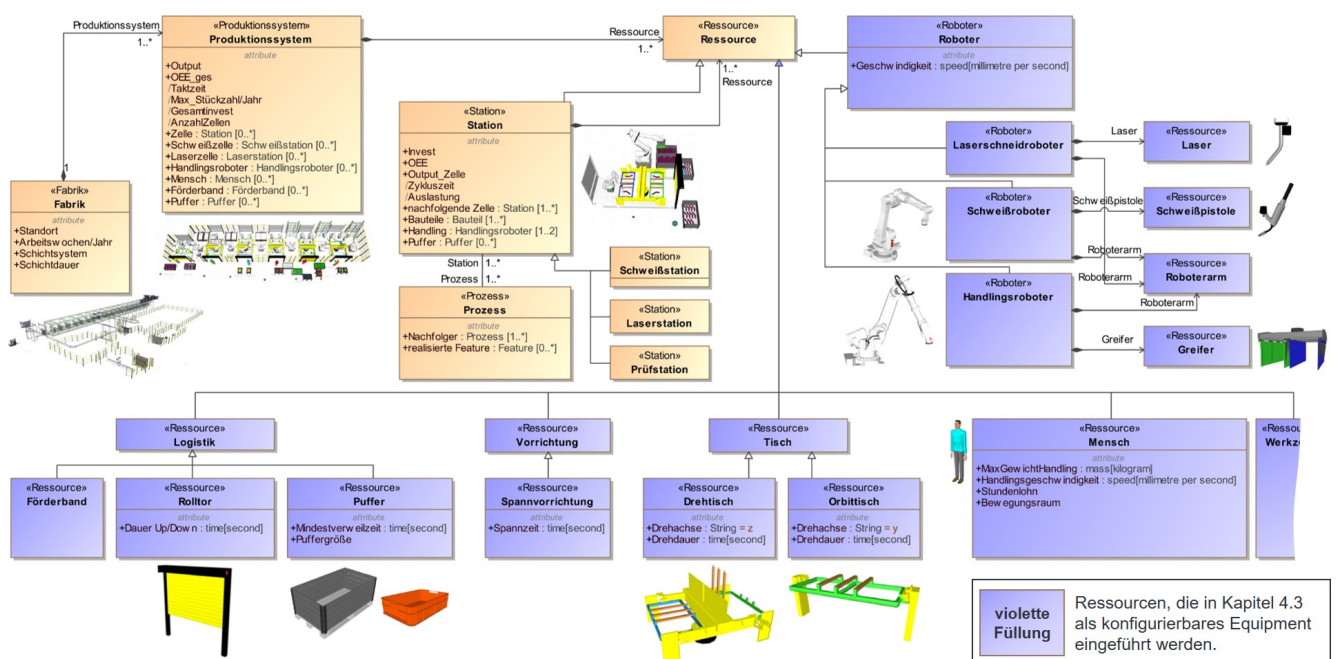


Abbildung 4.19: Ausschnitt aus der Referenzarchitektur des Produktionssystemmodells (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schenkel 2023).

Um ein spezifisches Produktionssystem zu modellieren, müssen die Ressourcen analog zum Produktmodell instantiiert werden. Die Modellierung kann dabei auf der Analyse des bestehenden Produktionsapparats basieren. Geometrische (z. B. Eigenschaft Spannvorrichtung) und alphanumerische (z. B. Füge- oder Einstellparameter) Vorgaben können aus einer Datenbank in das Modell übertragen werden (Feldmann & Schmuck et al. 2008). Als Resultat dieser Modellierungsphase liegt folglich ein instanziiertes Produktionssystemmodell vor. Durch die modellierten Beziehungen zwischen den Instanzen wird ein Modulbaukasten definiert, der auch für die Visualisierung und Simulation des Produktionssystems in Kapitel 4.4 verwendet wird. So realisieren Kompositionsbeziehungen den modularen Aufbau selbst, während Kardinalitäten durch ergänzende Mengenangaben ein Regelwerk (z. B. max. 2 Roboter pro Station) zur Einschränkung der Kombination von Systemelementen umsetzen.

Wechselwirkungen im PPR-Modell

Dieser Schritt ist für die assistierte Produktionssystemplanung besonders relevant und beabsichtigt die Systemelemente (i. A. Klassen) aus Produkt- und Produktionssystemmodell sowie deren Attribute miteinander in Beziehung zu setzen. Diese Beziehungen werden Wechselwirkungen genannt. Zur Modellierung von Wechselwirkungen zwischen Klassen mit SysML eignet sich im Wesentlichen die Allokationsbeziehung. Eine **Allokation** weist ein Systemelement (z. B. einem Feature) einem anderen Systemelement (z. B. einem Prozess) zu. Hierdurch lassen sich sog. Planungsregeln formalisieren. Darunter werden Zusammenhänge zwischen Produkt, Prozess und Produktionssystem verstanden, die ein erfahrener Planer bei der Durchführung der Produktionssystemplanung implizit berücksichtigt. In Anlehnung an die MoSyS-Ontologie (Abschnitt 4.2.1) und das jeweilige Vorgehen in mecPro² (Cadet & Sinnwell et al. 2017), bei CONSENS (Gausemeier & Brandis et al. 2012), dem PPR-Modell (Feldmann & Schmuck et al. 2008) oder nach Bossmann (2007) werden die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktion über die betriebsmittelunabhängige Prozessebene modelliert. Es ergeben sich drei Arten von Wechselwirkungen:

Produkt-Prozess: Der Zusammenhang zwischen herzustellenden Features und den korrespondierenden Fertigungsverfahren ist in verfügbaren Datenbanken dokumentiert. Für die Modellierung kann z. B. die STEP-Norm AP224 nach ISO 10303 (2006) herangezogen werden. Hier werden Features nach ihren Produktionsprozessen kategorisiert. (A_Pflugfelder 2021) Diese allgemeinen Zusammenhänge werden dem Anwender über die Referenzarchitektur zur Verfügung gestellt. Dieser kann jedoch weitere Wechselwirkungen zwischen Produkt und Prozess anlegen und instantiieren. Erfordert bspw. eine bestimmte Produkt- oder Bauteilvariante einen spezifischen, zusätzlichen Prozessschritt (z. B. Dichtigkeitsprüfung eines verschweißten Hohlkörpers), so kann dieser Zusammenhang abgebildet werden.

Prozess-Prozess: Um Abfolgerestriktionen von Prozessen zu modellieren, müssen – wenn vorhanden – Wechselwirkungen zwischen Prozesselementen selbst modelliert werden. Neben den bereits erwähnten allgemeinen, technologischen Vorrangbeziehungen (z. B. Urformen vor Umformen, siehe Jacob & Windhuber et al. 2018) können Restriktionen zwischen Prozessschritten mit der Notation des α -Algorithmus nach van der Aalst (2016) abgebildet werden. Dieser unterscheidet zwischen direktem Nachfolger ($X < Y$), Kausalität ($X \rightarrow Y$), Parallelität ($X \parallel Y$) und Unabhängigkeit ($X \# Y$). Dadurch lassen sich einfache Nachfolgebeziehungen sowie AND- und OR-Verzweigungen und Zusammenführungen realisieren.

Prozess-Produktion: Bei der Zuordnung von Prozess und Produktion ist zwischen allgemeinen und spezifischen Zusammenhängen zu unterscheiden: Die Definition, welche Systemelemente welche Fertigungsverfahren der DIN 8580 (2003) ausführen können, kann allgemein modelliert und über eine Referenzarchitektur verfügbar gemacht werden. Für diese Zuordnung erhält jede Ressource eine sog. Produktionsprozessfähigkeit (Eigner & Koch et al. 2017). Über einen Abgleich von Fertigungsverfahren und Fähigkeiten werden instanzübergreifende Beziehungen für alle Elemente einer Klasse angelegt. Auf dieser abstrakten Ebene können sog. Lösungsmuster eingesetzt werden, die Informationen über die Wechselwirkungen enthalten (A_Reichardt 2021). Die spezifische Zuordnung von instanziierten Prozessen zu instanziierten Ressourcen beschreibt ein Optimierungsproblem, auf welches im nachfolgenden Kapitel 4.3 eingegangen wird.

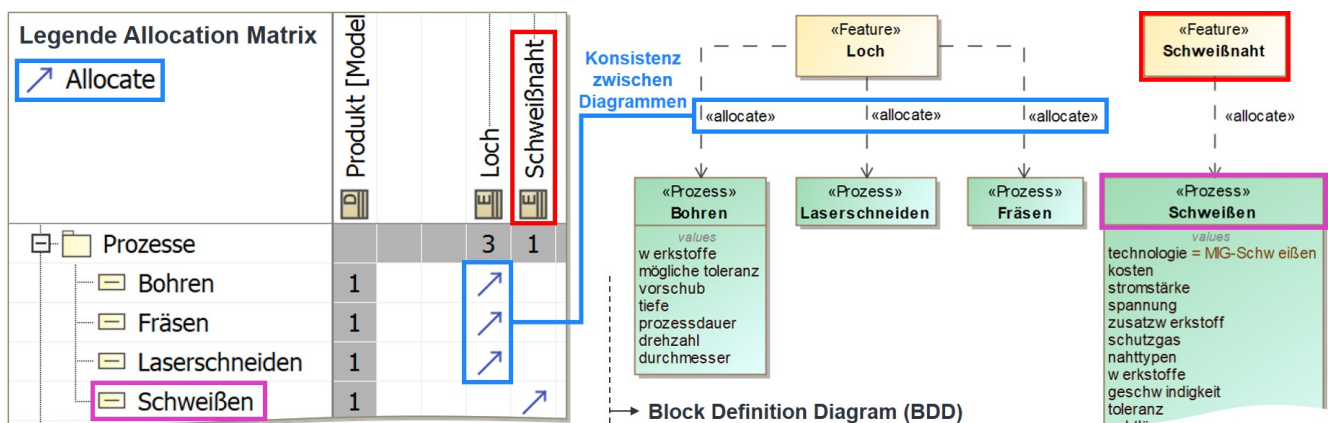


Abbildung 4.20: Allokation von Feature und Prozess anhand einer Allocation Matrix (links) und einem BDD (rechts) (eigene Darstellung).

Für eine einfache Modellierung und Darstellung der Allokationsbeziehung eignet sich die SysML Allocation Matrix. Abbildung 4.20 visualisiert das am Beispiel der Zuordnung von Features zu Prozessen. Die Verwendung von SysML Diagrammen in Cameo setzt dabei den Grundgedanken einer disziplinübergreifenden, konsistenten Modellierung nach den Prinzipien des MBSE um: Die Diagramme (Allocation Matrix oder BDD) stellen lediglich eine Sicht auf

das Systemmodell dar. Wird bspw. in der Matrix eine Beziehung hinzugefügt (oder gelöscht), erscheint diese auch im zugehörigen BDD bzw. jedem anderen Diagramm (nicht mehr).

Neben der Allokationsbeziehung zwischen Klassen ist es für die Abbildung von Planungsregeln unerlässlich Wechselwirkungen zwischen Attributen zu spezifizieren. Diese Beziehungen werden **Constraints** genannt. Wie Abbildung 4.21 zeigt, ist wie bei der Allokation das betriebsmittelunabhängige Prozesselement der Mittelpunkt bei der Modellierung von Constraints (gestrichelte Linien) zwischen Attributen von Produkt und Produktionssystem.

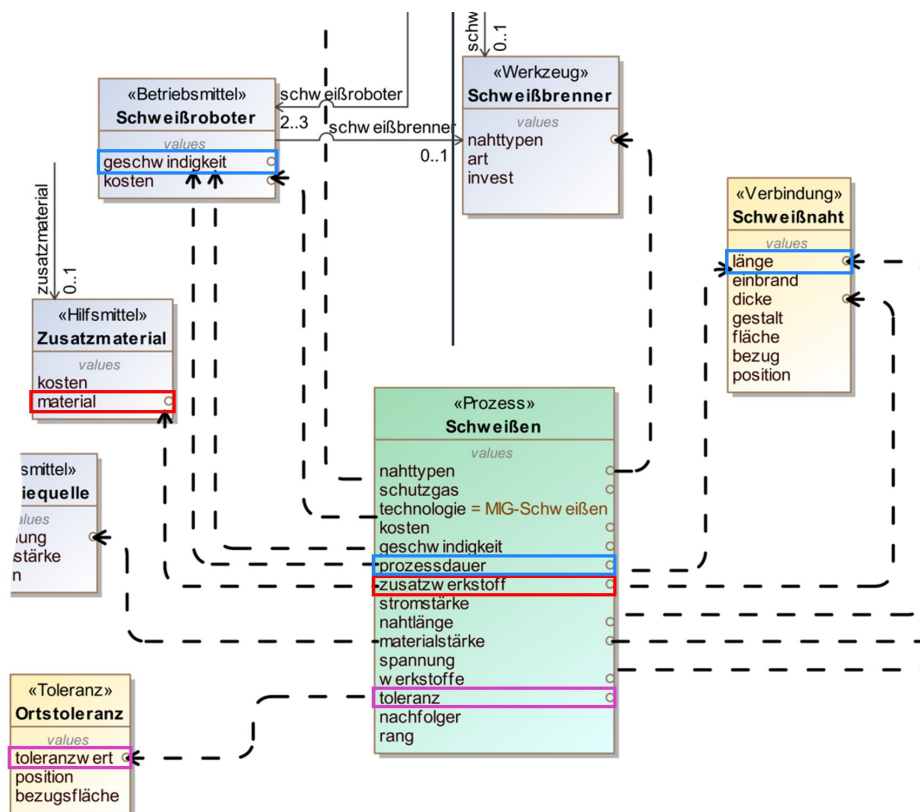


Abbildung 4.21: Constraints zwischen Attributen von Produkt, Prozess und Produktionssystem (eigene Darstellung).

Neben der einfachen Übernahme eines Attributs bzw. dessen Wert (z. B. *Material* – in Abbildung 4.21 rot) können Attribute verglichen (z. B. *Bauraum* «Ressource» > *Abmessung* «Bauteil» oder *Toleranzfähigkeit* «Prozess» \geq *Toleranzanforderung* «Feature» – in Abbildung 4.21 pink) und berechnet (z. B. *Dauer* «Prozess» = *Länge* «Schweißnaht» / *Schweißgeschwindigkeit* «Roboter» – in Abbildung 4.21 blau) werden. Die zugehörigen Formelzusammenhänge werden in sog. Parameterdiagrammen hinterlegt.

Abbildung 4.22 zeigt dafür ein einfaches Beispiel zur Berechnung von Gewicht (in Abbildung 4.22 rot) und Abmessung (in Abbildung 4.22 blau) eines Produkts bestehend aus mehreren Bauteilen. Die Implementierung der Constraints ermöglicht eine automatische Ableitung der Attribute beim Modellieren des PPR-Systems.

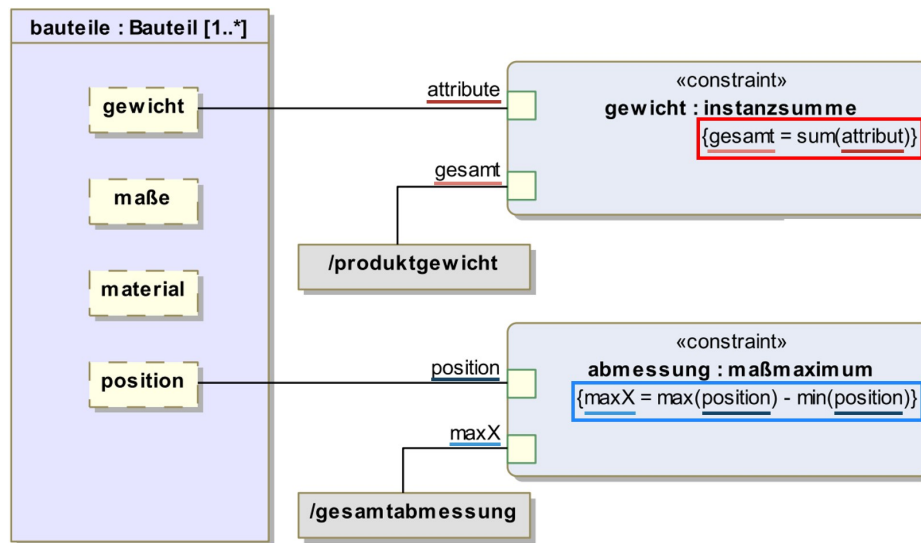


Abbildung 4.22: Ableitung und Berechnung von Attributen anhand von Constraints (eigene Darstellung).

Um an dieser Stelle Bezug auf den Gesamtkontext der vorliegenden Arbeit zu nehmen, sei erwähnt, dass die Beziehungen und Constraints oft grobe Zusammenhänge darstellen. Aufgrund des Zeitpunkts der Grobplanung werden reale Zusammenhänge abstrahiert (z. B. Weg-Geschwindigkeit-Zeit Beziehung statt Optimierung der Roboterbahnplanung), um möglichst schnell zu einem ausreichend guten Ergebnis zu kommen.

Nutzung zur Ableitung des variantenspezifischen Prozessvorranggraphen

Diese letzte Phase beschreibt die Nutzung des integrativen PPR-Modells mit einem bestimmten Zweck. Es existieren verschiedene Aktivitäten zur Modellnutzung wie bspw. die Analyse der Ausbreitung und Auswirkung von Änderungen in einem modellierten System (Schäfer & Günther et al. 2023). Für die vorliegende Arbeit ist die Nutzung des Modells zur Ableitung des Prozessvorranggraphen relevant (vgl. Abbildung 4.12). Die Basis dafür sind die im Rahmen des ersten Schritts der assistierten Produktionssystemplanung (Kapitel 4.1) identifizierten Features und Bauteilvarianten. Diese werden anhand einer ähnlichkeitsbasierten Klassifikation dem Baukasten (i. A. Produktmodell) zugeordnet. Mithilfe der modellierten Wechselwirkungen lassen sich die notwendigen Prozessschritte und deren Abfolgerestriktionen identifizieren. Dabei wird Erfahrungswissen in Form von Planungsregeln explizit berücksichtigt (vgl. FF2). Als Ergebnis dieses zweiten Schritts der assistierten Produktionssystemplanung liegt der Prozessvorranggraph (vgl. Output I) inkl. der relevanten Prozessinformationen (z. B. Art und Dauer der Prozessschritte) vor. Dieser stellt die Grundlage für die nachfolgende Optimierung des Produktionssystems dar. Weiter definiert das PPR-Modell den modularen Anlagenbaukasten (und dessen Zusammenhang mit Produkteigenschaften), welcher den Lösungsraum bei der Zuweisung von Prozessschritten zu Stationen beschränkt (siehe Kapitel 4.3).

4.2.3 Datengetriebene Modellierung zur Reduktion des manuellen Aufwands

Die im vorausgehenden Abschnitt beschriebenen Planungsregeln müssen als Zusammenhänge zwischen Produkt, Prozess und Produktionssystem manuell identifiziert und modelliert werden. Im Hinblick auf das Ziel der Reduktion des wiederkehrenden Aufwands der variantenspezifischen Produktionssystemplanung beschreibt dieses Vorgehen einen hohen initialen, manuellen Modellierungsaufwand. Das wiederum motiviert die Fragestellung, ob solche Planzusammenhänge datengetrieben identifiziert werden können, um den manuellen Aufwand insgesamt zu reduzieren. Der Industriestandard zum datengetriebenen Vorgehen wird als *Cross Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM) bezeichnet. Das Vorgehen besteht aus den Phasen Business und Data Understanding, Data Preparation, Modeling, Evaluation und Deployment, die iterativ durchlaufen werden (Wirth & Hipp 2000).

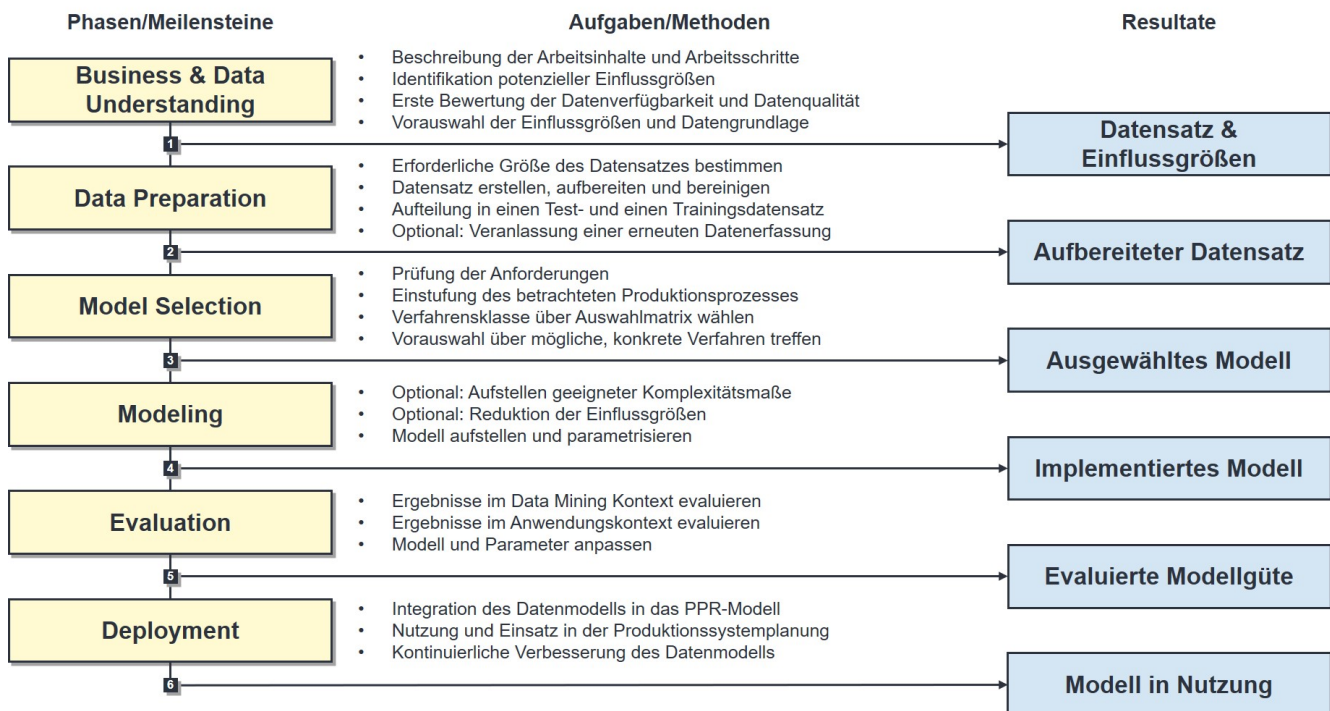


Abbildung 4.23: Vereinfacht sequenzielle Darstellung des CRISP-DM Vorgehens nach Wirth & Hipp (2000) ergänzt in A_Gese (2024) (eigene Darstellung).

Im Kontext von PPR-Zusammenhängen ist für die vorliegende Arbeit die datengetriebene Ermittlung von Planzeiten besonders relevant. Planzeiten beschreiben den Zusammenhang zwischen Eigenschaften von Produkt und Produktionssystem und der resultierenden Prozesszeit und haben einen direkten Einfluss auf die Herstellkosten. Bei der Analyse von Planzeiten aus vorhandenen Produkt- und Produktionsdaten stellt die Auswahl eines geeigneten Modells zur Abbildung der Zusammenhänge eine zentrale Herausforderung dar. Aus diesem Grund wird das CRISP-DM Vorgehen von A_Gese (2024) um die Phase der Model Selection ergänzt (siehe Abbildung 4.23) und im Folgenden kurz im Bezug auf die Anwendung zur

Planzeitbestimmung beschrieben. Das Vorgehen eignet sich zur Ermittlung von Planzeitzusammenhängen unterschiedlicher Granularität. Für die Prognose von stationsübergreifenden Durchlaufzeiten ist jedoch die statistische Unabhängigkeit und identische Verteilung der einzelnen Prozessschritte zu überprüfen. Aus diesem Grund fokussiert das Vorgehen Planzeiten einzelner Teilvorgänge bzw. Prozessschritte und deren Integration in die SysML-Modelle.

Beim **Business Understanding** geht es darum, den betrachteten Produktionsprozess und dessen produktseitigen Einflüsse zu verstehen. Analog beschreibt das **Data Understanding** das Hinterfragen der aktuellen Bestimmung und Erfassung der Zeitgrößen. Der Fokus liegt auf der Ermittlung der Einflussgrößen und der Analyse von Validität und Qualität der vorliegenden Daten. Hierzu eignen sich Lean-Werkzeuge wie die 5M-Methode oder ein Ishikawa-Diagramm (Brüggemann & Bremer 2015). Mögliche, allgemeine Einflussgrößen auf die Produktionszeit sind in Abbildung 4.24 als Ishikawa-Diagramm dargestellt. Es ist anzumerken, dass nicht immer alle Einflussgrößen bestimmt werden können. Vor allem dynamische Größen (wie z. B. die Materialverfügbarkeit) sind zum Zeitpunkt der Grobplanung nicht bekannt und werden so meist durch Annahmen und Default-Werte ersetzt.

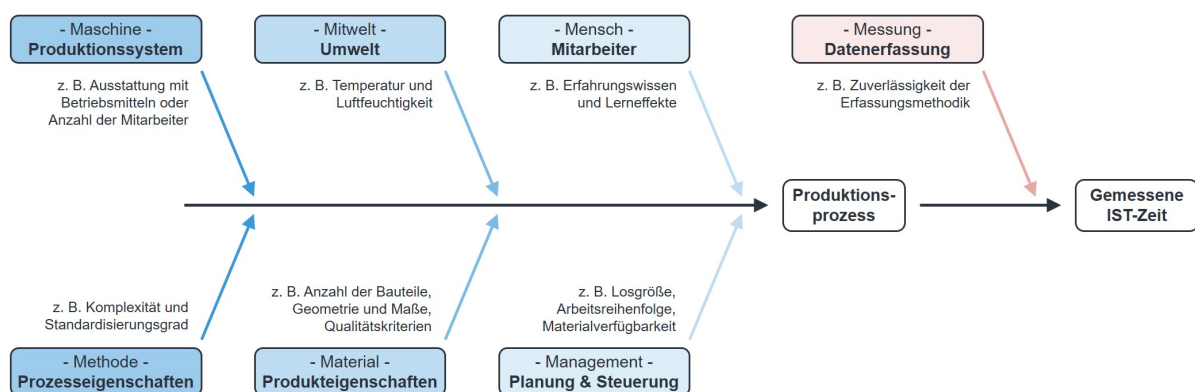


Abbildung 4.24: Allgemeine Einflussgrößen auf die gemessene Ist-Produktionszeit (eigene Darstellung in Anlehnung an Sudhoff 2023).

Das Vorwissen aus den vorausgehenden Phasen kann bei der **Data Preparation** genutzt werden, um eine geeignete Datenbasis aufzubauen und aufzubereiten. Letzteres behandelt die qualitative Analyse und Bereinigung des Datensatzes um fehlerhafte oder fehlende Daten (Wirth & Hipp 2000). Gerade bei der Ermittlung von Planzeiten liegen häufig viele Einflussfaktoren (i. A. Merkmale) bei geringer Vergleichbarkeit der Datenpunkte vor. Folglich sollten die vorliegenden Datensätze entsprechend groß sein. In der industriellen Anwendung liegen teils nur kleine Datensätze vor (Goodfellow & Bengio et al. 2016). Das ist bei der nachfolgenden Modellauswahl zu berücksichtigen. Heutzutage existiert eine Vielzahl verfügbarer Data Mining Verfahren. Ziel der ergänzten Phase **Model Selection** ist es daher, die Auswahl geeigneter Verfahren abhängig von der vorliegenden Aufgabe zu unterstützen. Zur Planzeitbestimmung müssen die Verfahren folgende Eigenschaften erfüllen: (A_Gese 2024)

- 1 Vorhersage einer Zeitgröße durch Lösung eines Regressionsproblems
- 2 Ergebnisse bzw. identifizierte Zusammenhänge sind für Menschen nachvollziehbar und interpretierbar
- 3 Robustheit gegenüber *Overfitting* bei kleinen Datenmengen
- 4 Robustheit gegenüber schlechter Datenqualität (z. B. Ausreißer)
- 5 Berücksichtigung stochastischer Einflussgrößen

Weiter ist die Modellauswahl von den Eigenschaften des betrachteten Produktionsprozesses abhängig. Diese werden bei dem in A_Gese (2024) entwickelten Auswahlchema durch zwei Dimensionen abstrahiert: Die produktseitigen Freiheitsgrade werden durch die Anzahl und Komplexität der Bauteile (vertikale Dimension) zusammengefasst, während die produktionsseitigen Freiheitsgrade (z. B. Mitarbeiter oder Maschine) durch die Variabilität des betrachteten Arbeitsablaufs (horizontale Dimension) charakterisiert werden. Ersteres korreliert mit der Anzahl an Merkmalen, letzteres steht in Zusammenhang mit der Anzahl benötigter Datenpunkte. Abbildung 4.25 visualisiert die resultierende Matrix.

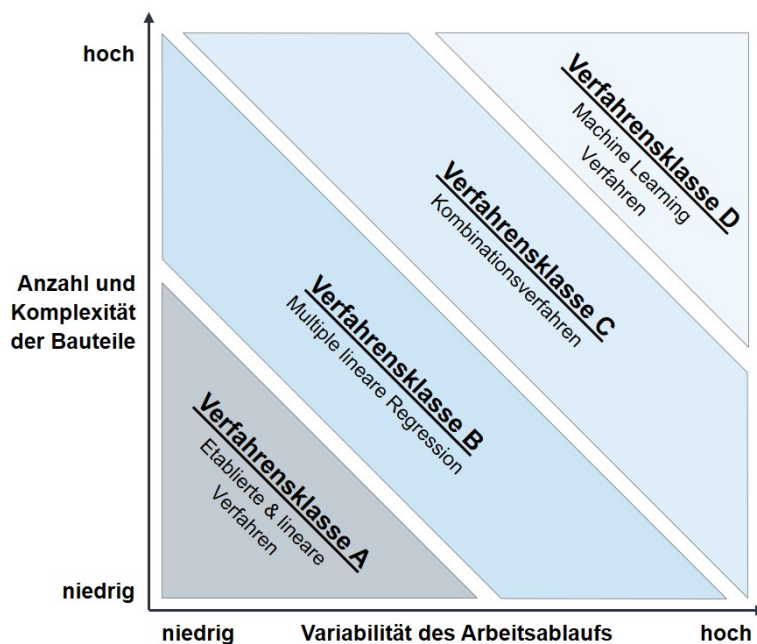


Abbildung 4.25: Matrix zur Auswahl geeigneter datengetriebener Verfahren zur Planzeitbestimmung (eigene Darstellung nach A_Gese 2024).

- A** Bei Produktionsprozessen mit wenigen Bauteilen, standardisiertem Vorgehen und fixer Arbeitsfolge eignen sich Verfahren nach REFA oder MTM. Die Wiederholbarkeit der Prozesse ist hoch, sodass nur geringe Abweichungen vorliegen. Gegebenenfalls können mit einfachen linearen Verfahren Formelzusammenhänge abgebildet werden. Aufgrund der geringen Anzahl von Einflussgrößen reichen kleine Datensätze, um durch die Addition von Zeitanteilen Planzeiten zu bestimmen.
- B** Diese Klasse umfasst all jene Produktionsprozesse, die zwar mehrere jedoch eindeutig bestimmbare Einflussgrößen besitzen. Das liegt dann vor, wenn wenige Bauteile mit

- überschaubarer Komplexität in einem semistrukturierten Prozess hergestellt werden. Zu deren Planzeitbestimmung eignet sich die multiple lineare Regression.
- C** Wenn neben bekannten Einflussgrößen von zusätzlichen, stochastischen oder vorab unbekannten Einflussgrößen ausgegangen wird, schlägt die vorliegende Arbeit den Einsatz von Kombinationsverfahren vor. Diese setzen die Planzeit aus einem deterministischen (berechnet durch Verfahren der Klasse A) und einem stochastischen Zeitanteil (berechnet durch Verfahren der Klasse B oder D) zusammen.
- D** Die letzte Klasse umfasst alle unstrukturierten Produktionsprozesse mit einer Vielzahl komplexer Bauteile. Da die vorliegenden Zusammenhänge aufgrund unüberschaubar vieler Einflussgrößen schnell komplex werden, eignen sich Verfahren des *Maschinellen Lernens* (ML). So können auch nichtlineare und unbekannte Zusammenhänge abgebildet werden. Für Menschen erklärbare Repräsentationen solcher Einflüsse auf Planzeiten erzeugen sog. Entscheidungsbäume (engl. *Decision Trees*) oder ein *Random Forest* (mehrere verschieden trainierte Entscheidungsbäume mit Mehrheitsvotum). Besonders komplexe Zusammenhänge lassen sich über ein *Multi-Layer Perzeptron* (MLP) darstellen. Es existiert eine Vielzahl von frei verfügbaren Algorithmen, die unterschiedlich gut für die Bestimmung von Planzeiten geeignet sind. Bei der Auswahl können sog. *cheat sheets* helfen. Ein prominentes Beispiel ist das `scikit-learn`¹ *algorithm cheat sheet*, das in Abbildung 4.26 auszugsweise dargestellt ist.

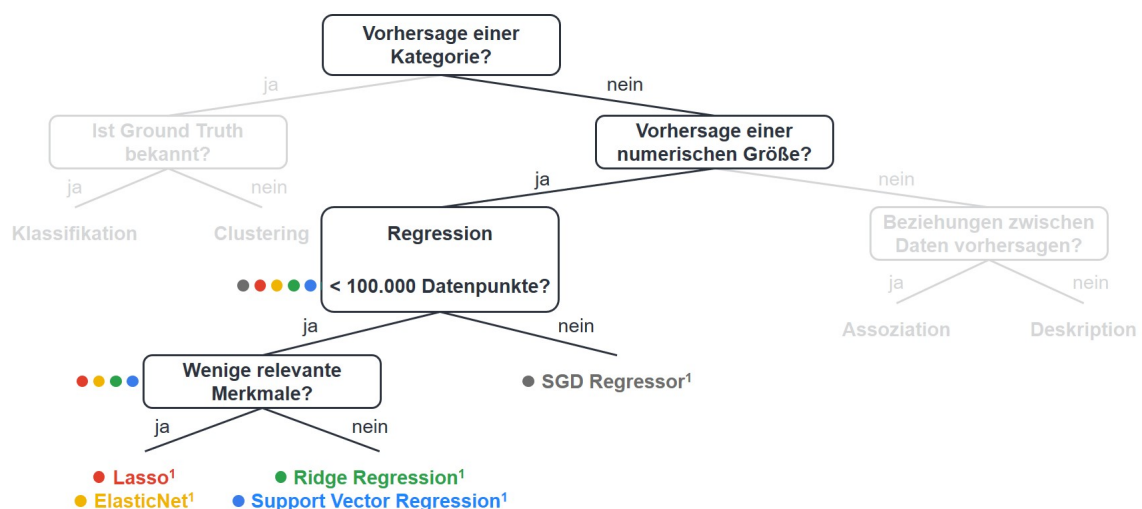


Abbildung 4.26: Auswahl von `scikit-learn` Regressionsalgorithmen (eigene Darstellung in Anlehnung an `scikit-learn`¹).

Das **Modeling** bezeichnet die Phase der eigentlichen Datenauswertung. Da die Aktivitäten zum Aufstellen und Parametrisieren des Modells stark von dem zuvor ausgewählten Verfahren abhängig sind, wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen und auf Abschnitt 5.2.3 verwiesen. Ziel ist die datengetriebene Ermittlung von für Menschen nachvollziehbaren

¹ https://scikit-learn.org/stable/tutorial/machine_learning_map/index.html (besucht am: 01.10.2024)

Zusammenhängen zwischen Einflussgrößen (z. B. Eigenschaften von Produkt und Produktionssystem) und der Prozesszeit. Abbildung 4.27 zeigt anhand eines einfachen Beispiels das Ergebnis eines Entscheidungsbaums. Diese datenbasierten Planungsregeln können als Wechselwirkungen in die Systemmodellierung integriert werden.

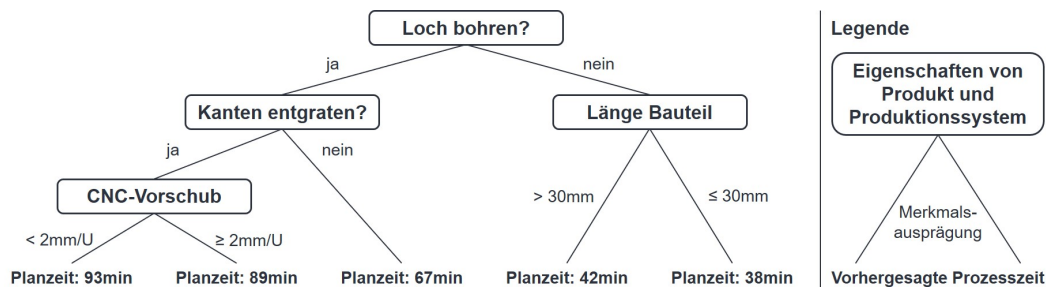


Abbildung 4.27: Beispielhafter Entscheidungsbaum zur Planzeitbestimmung (eigene Darstellung in Anlehnung an Welsing & Maetschke et al. 2021).

Die Phase der **Evaluation** befasst sich mit der Bestimmung der Modellgüte. Hierfür gibt es verschiedene Metriken, die sich unterschiedlich gut für die Analyse der Planzeit von Produktionsprozessen eignen. Neben der Schwankungsbreite und der zu erwartenden, mittleren Abweichung zwischen Plan- und Ist-Zeit ist die Anpassungsgüte eines Modells zu evaluieren. Diese sagt aus, wie gut das Modell den Zusammenhang zwischen Einflussgrößen und Ist-Zeit erklärt. Hierzu eignet sich die Kombination aus dem Bestimmtheitsmaß R^2 , dem *Root Mean Squared Error* (RMSE) und dem *Mean Average Percentage Error* (MAPE). R^2 gibt den durch das Modell erklärbaren Anteil der Gestamtstreuung an (Fahrmeir & Heumann et al. 2016). Der RMSE ist als die Wurzel aus dem mittleren, quadrierten Schätzfehler (Wazir & Langs et al. 2022) und der MAPE als durchschnittlicher, mittlerer, prozentualer Schätzfehler (Schuh & Gützlaß et al. 2020) definiert.

Die letzte Phase des **Deployment** umfasst die Implementierung des Modells zum festgelegten Zweck im entsprechenden Zielsystem. Im vorliegenden Fall ist das die Integration in die im vorausgehenden Abschnitt 4.2.2 beschriebene Modellierung der PPR-Zusammenhänge.

4.3 Optimierung des Produktionssystems

Der über die Modellierung der PPR-Zusammenhänge ermittelte Prozessvorranggraph ist die Grundlage für die folgende Optimierung des Produktionssystems. Ein Vorranggraph beschreibt noch keine eindeutige Reihenfolge der Durchführung der Prozessschritte, sondern schränkt die Reihenfolge lediglich durch die enthaltenen Abfolgerestriktionen ein. Die sog. Traversierung des Vorranggraphen erfolgt im Rahmen der betriebsmittelbezogenen Zuordnung von Prozessschritten (im Folgenden allgemein Aufgaben genannt) zu Ressourcen (im Folgenden Stationen genannt). Dabei liegt ein mathematisches Problem vor, welches in der

Literatur als *Assembly Line Balancing Problem* (ALBP) bezeichnet wird (siehe Kapitel 2.1.3). Als Antwort auf *FF3* und damit als Output dieses dritten Schritts zur assistierten Produktionssystemplanung liegt das multikriteriell optimierte, variantenspezifische Produktionssystem vor. Das Vorgehen ist in in Abbildung 4.28 dargestellt.

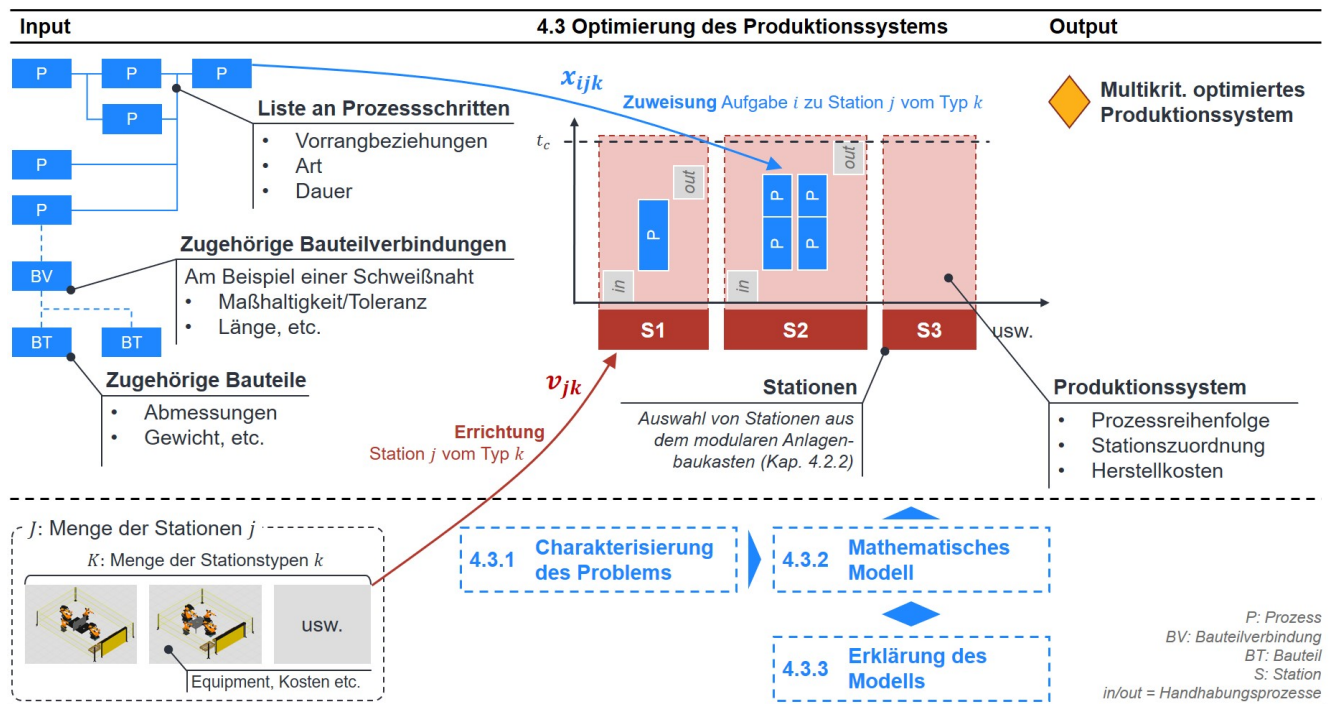


Abbildung 4.28: Vorgehen zur Optimierung des Produktionssystems (eigene Darstellung).

Um auf Basis des Prozessvorranggraphen die Austaktung des Produktionssystems vorzunehmen, ist das ALBP als mathematisches Modell zu formalisieren. Hierzu wird das vorliegende Problem im Abschnitt 4.3.1 zunächst anhand der in Kapitel 2.1.3.3 eingeführten Annahmen charakterisiert. Aufbauend darauf wird zur Beantwortung von *FF3* in Abschnitt 4.3.2 eine Methode zur mathematischen Modellierung und das resultierende mathematische Modell vorgestellt. Dieses wird schließlich in einem letzten Abschnitt 4.3.3 im Detail erklärt.

4.3.1 Charakterisierung des Assembly Line Balancing Problems

Eine grundlegende Beschreibung des allgemeinen ALBP findet sich im Grundlagenkapitel 2.1.3.3. Dabei wird zur Unterscheidung verschiedener Sub-Probleme die Systematik nach Boysen & Fliedner et al. (2007) eingeführt (siehe Abbildung 2.7). Diese unterscheidet für das *Simple ALBP* (SALBP) abhängig von gegebener bzw. zu minimierender Zykluszeit und Anzahl von Stationen zwischen insgesamt vier Kategorien: Diese Forschungsarbeit betrachtet (motiviert durch die reale Problemstellung) die Zuweisung von Aufgaben zu Stationen bei gegebener Taktzeit mit dem Ziel, die Anzahl der Stationen (und weitere Zielkriterien) zu minimieren (i. A. zu optimieren). Das entspricht einem Problem der Kategorie I. Für eine

detailliertere Charakterisierung des Problems stellt Boysen & Fliedner et al. (2007) ein Klassifikationsschema mit insgesamt 15 charakterisierenden Eigenschaften des Vorranggraphen (α), der Stationen (β) und der Zielfunktion (γ) vor. Dieses wird bereits im Stand der Forschung zur Identifikation von vergleichbarer Literatur verwendet (siehe Abschnitt 3.1). Es wird gezeigt, dass das in dieser Arbeit vorliegende Problem dem *Robotic ALBP* (RALBP) zuzuordnen ist. Beim RALBP wird nicht davon ausgegangen, dass alle Stationen gleich sind, sondern eine equipmentabhängige Modellierung der Stationen (durch Roboter) vorgenommen wird. Für das RALBP trifft Chutima (2022) insgesamt zehn vereinfachende Annahmen. Ähnlich wie beim SALBP nach Boysen & Fliedner et al. (2007) stellen die in der Literatur getroffenen Annahmen eine Abstraktion und Vereinfachung des realen Optimierungsproblems dar. Tabelle 4.4 charakterisiert das vorliegende ALBP¹ durch einen Vergleich mit dem S- bzw. RALBP. Es wird gezeigt, dass für die vorliegende Arbeit einige der Annahmen in Boysen & Fliedner et al. (2007) und Chutima (2022) nicht zutreffend sind, um das in der Realität (vgl. Anwendungsbeispiel Kapitel 5) vorliegende Problem hinreichend genau zu beschreiben. Dieses lässt sich wie folgt charakterisieren: (Schäfer & Tse et al. 2025)

- α Die Aufgaben unterliegen Vorrangbeziehungen, welche die Zuordnung zu Stationen einschränken. Weiter schränkt die Art der Aufgabe die Zuordnung ein. Es existieren Aufgaben, die zur Ausführung einem bestimmten Typ von Station zugeordnet werden müssen ($\alpha_5 = type$). Somit ergeben sich mehrere Möglichkeiten, eine Aufgabe auszuführen. Weiter müssen bestimmte Aufgaben auf mehrere Stationen aufgeteilt werden können. Das ist insbesondere beim Fügen durch Schweißen erforderlich.
- β Die Linie ist getaktet mit einer festen, stationsübergreifenden Taktzeit. Die maximale Taktzeit wird durch den Kunden durch das geplante Absatzvolumen und die zur Verfügung stehende Produktionszeit vorgegeben. Die Linie kann parallele Station beinhalten, um durch eine asynchrone Beladung die stationsinterne Zykluszeit zu halbieren (i. A. zu reduzieren). Dabei sind nicht alle Stationen gleich. Die in Abschnitt 4.2.2 eingeführte Prozessfähigkeit entscheidet über die mögliche Zuordnung einer Aufgabe. Die Fähigkeit einer Station wird durch das zugehörige Stationsequipment beeinflusst. Dabei sind einerseits mehr als ein und maximal zwei Roboter auszuwählen ($\beta_3 = pwork^2$). Andererseits wird das Equipment explizit nach den Regeln des Anlagenbaukastens aus Abschnitt 4.2.2 modelliert und nicht aus vordefinierten Alternativen ausgewählt ($\beta_4 = res^\circ$). Weiter beeinflusst diese Wahl des Equipments die Kosten der Station. Zuletzt sind auch unproduktive Zeiten als Teil der Stationszeit zu berücksichtigen ($\beta_5 = \Delta t_{unp}$). Dazu gehören Be- und Entladevorgänge sowie die Positionierung der Roboter.

¹ Aufgrund der Equipmentkonfiguration (z. B. Roboter) der Stationen ist das vorliegende Problem i. A. dem RALBP zuzuordnen. Da die für das RALBP gültigen Annahmen nach Chutima (2022) für diese Arbeit jedoch nicht vollständig zutreffen (siehe Tabelle 4.4), wird im Folgenden allgemein von einem *Assembly Line Balancing Problem* (ALBP) bzw. *Assembly Line Balancing* (ALB) Modell (ALB als Überbegriff) gesprochen.

- γ Das Umfeld der Produktionssystemplanung erfordert eine Berücksichtigung mehrerer, teils konkurrierende Optimierungsziele. Hierzu ist in der Zielfunktion eine Gewichtung der Teilziele erforderlich (z. B. Hauptziel Kostenminimierung $\gamma = Co$).

Tabelle 4.4: Zu- bzw. nicht zutreffende Annahmen des Simple (S) (Boysen & Flidner et al. 2007) und Robotic (R) (Chutima 2022) ALBP nach Schäfer & Tse et al. (2025).

S	R	Annahme / Vereinfachung	Trifft zu
1	1	Es handelt sich um die Massenproduktion eines homogenen Produkts.	Ja
2		Alle Aufgaben können nur auf eine vorbestimmte Weise ausgeführt werden.	Nein
3		Die Linie ist getaktet mit einer festen und stationsübergreifenden Taktzeit.	Ja
4		Die Fertigungslinie besitzt keine parallelen Elemente, sondern ist rein seriell.	Nein
5	3	Die Bearbeitungsreihenfolge der Aufgaben ist abhängig von Vorrangbeziehungen.	Ja
6	4	Die Bearbeitungszeiten der Aufgaben sind deterministisch (aber equipmentabhängig).	Ja
7		Die Zuordnung wird nur durch die Vorrangbeziehungen eingeschränkt.	Nein
8	2	Ein Aufgabe kann nicht auf zwei oder mehr Stationen aufgeteilt werden.	Nein
9		Alle Stationen besitzen die gleiche Equipment-Ausstattung.	Nein
	5	Die Fähigkeit einer Station entscheidet darüber, ob die Aufgabe der Station zugeordnet werden kann.	Ja
	6	Jede Station besitzt genau einen Roboter.	Nein
	7	Alle Stationen sind ununterbrochen einsatzbereit.	Ja
	8	Unproduktive Zeiten (Positionieren/Werkzeugwechsel) + Rüstzeiten sind vernachlässigbar.	Nein
	9	Be- und Entlade- sowie Transportzeiten von Werkstücken sind vernachlässigbar.	Nein
	10	Die Kosten von Robotern werden nicht berücksichtigt.	Nein

4.3.2 Mathematische Formulierung des Assembly Line Balancing Modells

Für die Entwicklung eines solch komplexen mathematischen Modells zur Beantwortung von FF3 eignet sich eine iterative Vorgehensweise vom Groben ins Feine. Die in Schäfer & Kochendörfer et al. (2023) vorgestellte Methode orientiert sich an dem ursprünglich aus der Softwareentwicklung bekannten Konzept des *data-driven development*. Dabei wird zunächst ein lauffähiges Minimalbeispiel aufgestellt, welches anschließend iterativ ergänzt wird (Bach & Langner et al. 2017). Um das Problem zu erfassen, sind gemäß der Bestandteile eines mathematischen Problems folgende vier Fragestellungen zu beantworten: (übersetzt aus Schäfer & Kochendörfer et al. 2023)

1. Was ist zu optimieren?	Zielfunktion
2. Was kann zur Optimierung verändert werden?	Variable(n)
3. Was ist gegeben?	Parameter
4. Welche Randbedingungen müssen berücksichtigt werden?	Constraint(s)

Die Beantwortung dieser Fragen führt zu einer ersten Abstraktion des Problems. Das zugehörige Modell besteht aus der Zielfunktion, den Variablen, Parametern und Constraints. Diese können mit dem Ziel einer möglichst exakten Abbildung des realen Entscheidungsproblems inkrementell ergänzt werden. (Schäfer & Kochendörfer et al. 2023) Gemäß dieses Schemas wird im Rahmen dieser Arbeit zwischen dem ALB Modell und den Modellerweiterungen I und II unterschieden. Im Folgenden wird entlang der vier Kategorien auf die wesentlichen Bestandteile des Modells eingegangen und die mathematische Formulierung vorgestellt. Aus Platzgründen sind alle Details zur mathematischen Formulierung des ALB Modells in **Anhang A3.1** und solche zum Erweiterungsmodell I in Anhang A3.2 dargestellt. Weiter erfolgt im nachfolgenden Abschnitt 4.3.3 eine ausführliche Erklärung des Modells. Hierbei wird explizit darauf eingegangen, wie das Modell die Eigenschaften aus der vorausgehenden Charakterisierung 4.3.1 berücksichtigt. Das hier dargestellte Modell legt Wert auf eine allgemein übertragbare Formulierung und wird erst in Kapitel 5.3 anwendungsfallspezifisch initialisiert.

Zielfunktion

Zur Berücksichtigung mehrerer Zielkriterien wird eine Ersatzzielfunktion nach der Methode der Skalarisierung eingeführt. Hierzu wird der Gewichtungsvektor λ (vgl. Kapitel 2.1.3.2) eingeführt. Das ermöglicht eine einfache Erweiterung des Modells um weitere Zielkriterien. Im Rahmen dieser Arbeit werden exemplarisch die Kostenminimierung und die Maximierung von Flexibilität, Qualität und Ergonomie betrachtet. Letztere wird als Constraint eingeführt. Für die Zielerreichung sind jeweils messbare Kriterien zu definieren. Die Gesamtkostenfunktion setzt sich nach Amen (2006) aus Lohn- und Kapitalkosten zusammen. Die Lohnkosten, die an einer Station auf einen Arbeiter entfallen, resultieren aus der zugewiesenen Aufgabe, die die höchste Qualifikation erfordert. Lohnkosten fallen zudem nicht nur während der Aktivitätszeit des Arbeiters, sondern während der gesamten Zykluszeit an. Kapitalkosten umfassen Zinsen und Abschreibungen für die Stationen. (Amen 2006) Die Flexibilität wird sowohl als Flächenreserve als auch als Taktzeitreserve minimiert respektive maximiert. Letzteres erfordert ein sog. *vertical balancing* ($\gamma = SSL^{line}$ nach Boysen & Fliedner et al. 2007). Das bewirkt ein Ausbalancieren der Stationszeiten. Die Qualität wird als erreichte Maßhaltigkeit berücksichtigt. Eine ausführliche Erklärung erfolgt in Abschnitt 4.3.3.

Variablen

Die bei der Lösung des Problems durch den Algorithmus festzulegenden Freiheitsgrade werden als Variablen bezeichnet (Nickel & Rebennack et al. 2022). Die zentrale Zuweisungs-

variable des ALBP wird mit x_{ijk} eingeführt. Sie gibt an, welcher Anteil der Aufgabe i auf Station j vom Typ k bearbeitet wird. Die Eröffnung einer Station j vom Typ k wird mit der Variable v_{jk} binär entschieden. Eine tabellarische Beschreibung aller 17 Variablen des ALB Modells sowie der 9 für die erste Modellerweiterung zusätzlich notwendigen Variablen kann Anhang A3.1.1 bzw. Anhang A3.2.1 entnommen werden.

Parameter

Die vorliegenden Informationen über den Input des Modells werden über Parameter abgebildet. Der betriebsmittelunabhängige Prozessvorranggraph enthält Informationen über die Aufgaben (z. B. die Bearbeitungszeit t_i für Aufgabe i), die benötigten Bauteile (z. B. die Masse m_p des Bauteils p) und deren Abfolgerestriktionen. Letztere werden als Vorrangmatrix P_{mn} (Aufgabe m vor Aufgabe n) aus den SysML-Diagrammen des PPR-Systemmodells aus Abschnitt 4.2 exportiert. Der Zusammenhang zwischen Produkt und Produktionssystem wird in der Fähigkeitsmatrix F_{ik} abgebildet. Diese gibt an, ob Aufgabe i auf dem Stationstyp k abhängig von dessen Prozessfähigkeit bearbeitet werden kann bzw. muss. Anhang A3.1.1 enthält eine vollständige tabellarische Beschreibung aller Parameter.

Constraints

Die Constraints charakterisieren ein mathematisches Problem (Nickel & Rebennack et al. 2022). Aus Platzgründen wird die mathematische Formulierung der 56 Constraints des ALB Modells und der 31 zusätzlichen Constraints des Erweiterungsmodells I in Anhang A3.1.2 bzw. Anhang A3.2.2 eingeführt. Weiter enthält Anhang A3.1.3 respektive Anhang A3.2.3 jeweils eine chronologische, textuelle Beschreibung aller Constraints des ALB- sowie des ersten Erweiterungsmodells. Die Constraints der zweiten Modellerweiterung werden in Abschnitt 4.3.3.9 eingeführt. Im nachfolgenden Abschnitt wird detailliert darauf eingegangen, wie die Constraints die Charakteristik des realen Problems hinreichend genau abbilden.

4.3.3 Erklärung des entwickelten Assembly Line Balancing Modells

Die folgende Vorstellung¹ des entwickelten ALB Modells erfolgt nicht in chronologischer Reihenfolge der Constraints (vgl. Anhang A3.1.2). Zur besseren Nachvollziehbarkeit werden wie in Schäfer & Kochendörfer et al. (2023) methodisch beschrieben vom Groben ins Feine zunächst die grundlegenden Constraints erklärt, bevor anschließend die inkrementellen Erweiterungen des Modells ergänzt werden.

¹ Die folgende Erklärung des mathematischen Modells und damit der gesamte Abschnitt 4.3.3 orientiert sich an Struktur und Inhalt der Modellbeschreibung nach A_Schneider (2023), einer durch den Verfasser dieser Forschungsarbeit eng angeleiteten Masterthesis und deren Veröffentlichung in Schäfer & Tse et al. (2025). Aus Gründen der besseren Lesbarkeit verzichtet der Verfasser auf eine wiederholte Quellenangabe innerhalb dieses Abschnitts 4.3.3.

4.3.3.1 Einführung Mengenbezeichnungen

Die Prozessschritte aller Art werden im mathematischen Modell als Aufgaben bezeichnet. Die Menge I enthält alle Aufgaben i des Vorranggraphen. Die Teilmenge I^{crit} enthält die toleranzkritischen Aufgaben. Weiter enthält eine Aufgabe die mit ihr verbundenen Bauteile (vgl. Element und Feature in Abschnitt 4.2). Alle verwendeten Teile p sind in der Menge P zusammengefasst und werden den Stationen mit den Aufgaben zugeordnet. Diese zu eröffnenden Stationen j stehen für die mögliche Bearbeitung zur Verfügung. Die Menge J enthält alle potentiell zu eröffnenden Stationen j . Einerseits ist die Menge J hinreichend groß zu wählen, andererseits ist auf eine sinnvolle obere Schranke zu achten, um die Modellgröße in Abhängigkeit der Anzahl der Variablen überschaubar zu halten. Basierend auf der Trivillösung der Zuordnung einer Station je Aufgabe wird $|J| = |I|$ gesetzt, wobei die Anzahl der Aufgaben $|I|$ als Input aus der vorausgehenden Ableitung des Vorranggraphen vorliegt. Um die Realität verschiedener Arten von Aufgaben (z. B. Schweißen) abzubilden, wird für jeden Aufgabentyp ein zugehöriger Stationstyp k eingeführt. Die Menge K definiert entsprechend die verschiedenen Stationstypen.

4.3.3.2 Grundlegende Constraints des ALB

Constraint (1)¹ stellt die Kompatibilität von Aufgaben- und Stationstyp bei der Zuteilung der Aufgaben i zu Stationen j vom Typ k sicher. Hierzu nehmen die Einträge der Matrix F_{ik} den Wert 1 an, wenn Aufgabe i auf Stationstyp k bearbeitet werden muss. Damit wäre die Gleichheitsbedingung bei einer Zuweisung einer Aufgabe zu einem nicht kompatiblen Stationstyp (d. h. $x_{ijk} > 0$ und $F_{ik} = 0$) nicht mehr zu erfüllen. Gleichzeitig wird durch Aufsummierung über alle Stationen in Constraint (1) die vollständige Bearbeitung aller Aufgaben sichergestellt.

Die binäre Variable w_{ijk} dient dem Zweck weiterer Berechnungen und wird in den Constraints (2) und (3) eingeführt. Sie nimmt nur den Wert 1 an, wenn $x_{ijk} > 0$. Für diese Synchronisierung zwischen den Variablen w und x wird eine sog. Big-M-Formulierung verwendet. Dabei ist M eine hinreichend große Zahl.

Analog gibt die Binärvariable v_{jk} an, ob Station j vom Typ k eröffnet ist. Constraint (38) zählt diese Anzahl eröffneter Stationen und speichert sie in n . Durch Constraint (9) wird die Zuordnung zu einer Station nur dann ermöglicht, wenn diese Station eröffnet wurde. Gleichzeitig erlaubt Constraint (12) das Eröffnen einer Station nur dann, wenn der Station eine Aufgabe zugeordnet wird, d. h. wenn $w_{ijk} = 1$ für mindestens eine Aufgabe i . Ergänzend limitiert Constraint (10), dass jede Station ausschließlich einen Stationstyp besitzt. Um die Modellkomplexität zu reduzieren, wird die optionale Constraint (11) eingeführt. Sie stellt die

¹ Nummerierung bezieht sich auf die Constraints in Anhang A3.1.

zusammenhängende Eröffnung von Stationen als Linie sicher und verhindert, dass eine Station eröffnet wird obwohl die vorausgehende Station nicht eröffnet ist. So muss keine Entscheidung darüber getroffen werden, welche Stationsposition zu eröffnen ist, sondern die Stationen werden aufeinanderfolgend eröffnet.

4.3.3.3 Einhaltung der Vorrangbeziehungen

Die charakteristischste Eigenschaft des ALBP ist die Berücksichtigung von Vorrangbeziehungen bei der Zuordnung von Aufgaben zu Stationen. Vorrangbeziehungen bezeichnen dabei technisch oder organisatorisch begründete Abfolgerestriktionen zwischen Aufgaben (Boysen & Fliedner et al. 2007). Damit werden folglich harte Einschränkungen (Aufgabe *a* muss vor Aufgabe *b* vollständig bearbeitet sein) und nicht Empfehlungen (Aufgabe *a* sollte vor Aufgabe *b* bearbeitet werden) codiert. Die vorliegende Arbeit orientiert sich an der existierenden Literatur und trifft die Annahme, dass zwei Aufgaben, zwischen denen eine Vorrangbeziehung existiert, nicht derselben Station zugeordnet werden können. Somit ist die Vorgänger-Aufgabe auf einer Station zu beenden, die vor der Station liegt, auf der die Nachfolger-Aufgabe begonnen wird. Hierzu gibt die binäre Variable y_{ij} an, ob Aufgabe *i* auf Station *j* begonnen wurde. Constraint (14) setzt zusätzlich immer dann $y_{ij} = 1$, wenn für die vorausgehende Station $x_{ihk} > 1$ gilt. Analog zwingt Constraint (15) $y_{ij} = 0$ wenn dies nicht der Fall ist. Zusätzlich gibt eine weitere binäre Variable z_{ij} an, ob die Aufgabe *i* auf Station *j* bereits vollständig bearbeitet wurde. Die vollständige Bearbeitung wird dabei durch die Constraints (16) und (17) sichergestellt. In Constraint (13) wird die Vorrangbeziehung schließlich umgesetzt: Ist Aufgabe *m* vor Aufgabe *n* abzuschließen, dann nimmt die Vorrangmatrix P_{mn} an dieser Stelle den Wert 1 an. Die Aufgabe *n* darf dann erst begonnen werden bzw. y_{nj} den Wert 1 annehmen, wenn $z_{mj} = 1$ gilt. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, wird $y_{nj} = 0$ gesetzt.

4.3.3.4 Teilbarkeit von Aufgaben

Eine Besonderheit des präsentierten Modells ist die Implementierung der Teilbarkeit von Aufgaben. Dieser Aspekt wird im Stand der Forschung (vgl. Kapitel 3) bisher nicht berücksichtigt, ist jedoch für die Betrachtung von Fügeaufgaben wie bspw. das Schweißen relevant. Die Möglichkeit der nicht-diskreten Zuweisung wird direkt über die zentrale Zuweisungsvariable x_{ijk} realisiert. Wird eine Aufgabe *i* an einer Station *j* vom Typ *k* nur anteilig bearbeitet, nimmt x_{ijk} den Wert des bearbeiteten Anteils an. Die Constraints (46) - (48) definieren x_{ijk} folglich als kontinuierliche Variable mit einem zulässigen Wertebereich von $[0, 1]$. Um die Teilbarkeit einer Aufgabe einzuschränken, wird der Parameter x_i^{\min} eingeführt. Er gibt den minimal zu bearbeitenden Anteil an und wird in Constraint (8) überprüft.

Die Aufteilung bestimmter Aufgaben über mehrere Stationen hat eine Verlängerung der Gesamtbearbeitungszeit zufolge. Das wird erneut am Beispiel des Schweißens ($k = 1$)

erläutert: Wird eine Schweißnaht aufgeteilt, so ist eine sog. Überlappung (engl. *overlap*) zu schweißen. Die Idee gleicht dem Konzept des Strafterms. Hierzu wird die binäre Variable o_{ij} eingeführt, die entsprechend angibt ob für die Aufgabe i auf Station j eine Überlappung zu schweißen ist (i. A. eine Verlängerung der Gesamtbearbeitungszeit durch die Aufteilung vorliegt). Constraint (4) setzt $o_{ij} = 1$, wenn Aufgabe i zwar bearbeitet, aber noch nicht abgeschlossen ist. Analog setzen Constraint (5) bzw. (6) $o_{ij} = 0$, sollte keine Bearbeitung von i auf j erfolgen bzw. die Bearbeitung von i vollständig abgeschlossen sein. Constraint (7) erzwingt $o_{ij} = 0$ für alle Aufgabentypen, die keine Aufteilung erlauben (hier am Bsp. $k \neq 1$).

4.3.3.5 Auswahl des Stationsequipments

Wird eine Aufgabe einer Station zugeordnet, ist die resultierende Zykluszeit dieser Station von ihrem Equipment abhängig. Im Folgenden wird daher zunächst auf die Modellierung der Stationstypen eingegangen, bevor im Anschluss die Einhaltung der maximalen Taktzeit erläutert wird. Das in Abschnitt 4.3.2 formulierte ALB Modell unterscheidet zunächst zwischen drei Stationstypen mit Robotern (Schweißen $k = 1$, Laserschneiden $k = 2$, Prüfen $k = 3$) und ist beliebig erweiterbar. An jeder Station können gemäß Constraint (43 _{α}) maximal 2 parallel arbeitende Roboter eingesetzt werden. Für die Auswahl zwischen einem ($\alpha_j = 0$) oder zwei ($\alpha_j = 1$) Robotern wird die binäre Entscheidungsvariable α eingeführt.

Neben Robotern können weitere Entscheidungen bzgl. des Stationsequipments getroffen werden. Als Beispiel wird ein Drehtisch modelliert. Dieser nimmt Einfluss auf das Stationsverhalten, indem er parallel zur Bearbeitung der Aufgaben auf der Rückseite des Tisches eine Be- und Entladung auf der Vorderseite ermöglicht. Abzüglich der Zeit zum Drehen lässt sich so diesem Stationstyp mehr produktive Bearbeitungszeit zuordnen. Hinsichtlich der Peripherie existiert somit die Wahl zwischen mit (im Folgenden *Turntable Cell* (TC) genannt) und ohne Drehtisch (im Folgenden *Orbit Cell* (OC) genannt). Mathematisch unterschieden wird das durch die *One-Hot*¹ kodierten Variablen $\delta_j = 0$ für OC und $\delta_j = 1$ für TC.

Neben der produktiven Bearbeitungszeit wird die unproduktive Zeit einer Station durch das ausgewählte Equipment beeinflusst. Eine Berücksichtigung unproduktiver Zeiten findet in der Literatur meist nicht statt (vgl. Stand der Forschung Kapitel 3). In der Realität sind Handhabungsoperationen bei hochautomatisierten, getakteten Roboterlinien nicht zu vernachlässigen. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf drei Aspekte des Handlings eingegangen:

1. Allgemein ist das Beladen einer Station von dem gewählten Automatisierungsgrad des Handlings abhängig. Das vorliegende Modell unterscheidet hierbei in der Konfiguration einer Station diskret anhand eines sog. *one-hot encoding*¹ zwischen dem Beladen

¹ Bei der One-Hot-Kodierung werden Informationen binär als 1-aus-n mit n Bits dargestellt, wobei jeweils nur ein Bit auf 1 gesetzt wird (vgl. Mensch mit $\beta_j^H = 1$ und $\beta_j^R = 0$ oder Roboter mit $\beta_j^H = 0$ und $\beta_j^R = 1$).

durch einen Menschen ($\beta_j^H = 1$) oder durch einen Roboter ($\beta_j^R = 1$). In Constraint (44 $_\beta$) wird die Exklusivität (entweder Mensch oder Roboter) und in Constraint (45 $_\beta$) das Vorhandensein (Stationseröffnung nicht ohne Handling) der Auswahl sichergestellt.

2. Analog zum Beladen einer Station ist die Übergabe von einer Station zur nächsten modelliert. Diese Übergabe kann erneut durch einen Menschen ($\gamma_j^H = 1$) oder einen Roboter ($\gamma_j^R = 1$) erfolgen. Diese Konfiguration des Equipments bezieht sich immer auf die Station, aus der das Teil oder die Baugruppe entnommen wird.
3. Bei Fügeaufgaben ($k = 1$) sind neben der Übergabe aus der vorausgehenden Station weitere Teile zu beladen, die nicht bereits an einer vorausgehenden Station verbunden wurden. Hierzu speichert die Matrix N_{ip} , welche Teile p für eine Aufgabe i benötigt werden. Die binäre Variable l_{pj} gibt dann an, ob ein Teil p an der Station j erstmals verwendet wird. Constraint (18) stellt die Beladung eines Teils p an der ersten Station ($l_{p1} = 1$) sicher, wenn Teil p benötigt wird ($N_{ip} = 1$). Die Beladung weiterer Teile an nachfolgenden Stationen wird in Constraint (19) abgebildet. Constraint (20) stellt zudem sicher, dass Bauteile nur beladen werden, wenn diese an der jeweiligen Station verbaut werden. Das verhindert, dass der Algorithmus alle Bauteile einer Baugruppe an der ersten Station belädt. Da ein Beladen zusätzlicher Teile nur beim Fügen notwendig ist, werden in Constraint (43 $_\beta$) jeweils $\beta_j^H = 0$ und $\beta_j^R = 0$ gesetzt. Eine Modellierung der Übergabe noch unverbundener Teile oder beim Trennen ($k = 2$) getrennter Teile von einer Station zur nächsten erfolgt im ersten Erweiterungsmodell in Abschnitt 4.3.3.8.

Alle vier Variablen α, β, γ und δ zur Konfiguration des Stationsequipments haben gemeinsam, dass sie exklusiv für eröffnete Stationen verfügbar sind. Ist eine Station vom Typ k nicht eröffnet (d. h. für kein $k \in K$ gilt $v_{jk} > 0$), werden diese Equipment-Variablen in Constraint (42) auf den Wert 0 gesetzt.

4.3.3.6 Einhaltung der vorgegebenen Taktzeit

Wie in Abschnitt 4.3.1 kategorisiert, ist die maximale Taktzeit bei dem vorliegenden Problem fest vorgegeben. Es wird eine Reihe von Constraints (21) – (34) für jede Kombination an Stationsequipment α, β, γ und δ eingeführt, um die Zykluszeit einer Station zu bestimmen. Die Auswahl der Constraints ist folglich abhängig von der Equipment-Kombination und wird anhand des Entscheidungsbaums in Abbildung A3.1 durchgeführt. Die rechte Seite der Ungleichungen aller Taktzeit-Constraints (21) – (34) in Anhang A3.1.2 enthält jeweils die maximale Taktzeit c_t und eine Big-M-Formulierung, die die Constraint je nach Equipment-Kombination aktiviert bzw. deaktiviert. Das wird am Beispiel von Constraint (21) erklärt: Diese Constraint greift nur, wenn $\beta_j^R = \gamma_j^R = \delta_j = 1$ d. h. der Term in der Klammer vor dem Big-M Null ergibt. Auf der linken Seite der Ungleichungen wird zudem die Variable t^{res}

aufsummiert, um für die Optimierung der Flexibilität die geltende Taktzeitreserve zu ermitteln. Diese verletzt die Ungleichung nie, aber erfüllt die Ungleichung durch Gleichheit einzig auf der taktbestimmenden Station mit der geringsten Taktzeitreserve.

Die Constraints (21) – (26) decken alle Kombinationen mit einem Drehtisch ab. Dabei gilt die Besonderheit, dass die Taktzeit c_t sowohl auf der Handhabungs- als auch auf der Bearbeitungsseite einzuhalten ist. Die Constraints (21) – (24) bilden die Handhabungsseite ab: Die Handhabungszeit setzt sich aus der Zeit zum Entnehmen der Teile des vorherigen Takts ($t^{\text{out}, R}$ bzw. $t^{\text{out}, H}$), dem Beladen der Teile (per Roboter $t_p^{\text{in}, R}$ oder Mensch $t_p^{\text{in}, H}$ aufsummiert über alle Teile p) und dem Drehen des Tisches (t^{turn}) zusammen. Die Constraints (25) und (26) bilden analog die Bearbeitungsseite ab: Neben der unproduktiven Zeit zur Positionierung der Roboter wird hier die Gesamtbearbeitungsdauer t_i einer Aufgabe i multipliziert mit dem auf Station j bearbeiteten Anteil x_{ijk} . Hinzu kommt optional der Strafterm für eine Überlappung. Das Hinzunehmen eines zweiten Roboters halbiert per Annahme ausschließlich die Bearbeitungszeit. Analog zur Handhabungsseite werden t^{turn} und t^{res} addiert. Ohne Drehtisch existiert je Station nur noch eine Constraint zur Einhaltung der Taktzeit. In diesen Constraints (27) - (34) folgen die Summanden dem bereits bekannten Muster.

Eine Herausforderung bei der Modellierung der Handhabungszeit ist die Übergabe zwischen den Stationen. Hierbei wird angenommen, dass die Weitergabe der Zwischenprodukte synchronisiert am Ende eines Takts durchgeführt wird. Um auszuschließen, dass sich Mensch und Roboter während der Übergabe in/aus einer Station behindern, wird eine gleiche Übergabedauer für Mensch und Roboter angenommen. Diese Vereinfachung stellt sicher, dass bis zum Zeitpunkt [Taktende abzüglich Annahmedauer] die Zwischenprodukte an allen Stationen entnommen sind. Das Prinzip wird in Abbildung 4.29 visualisiert.

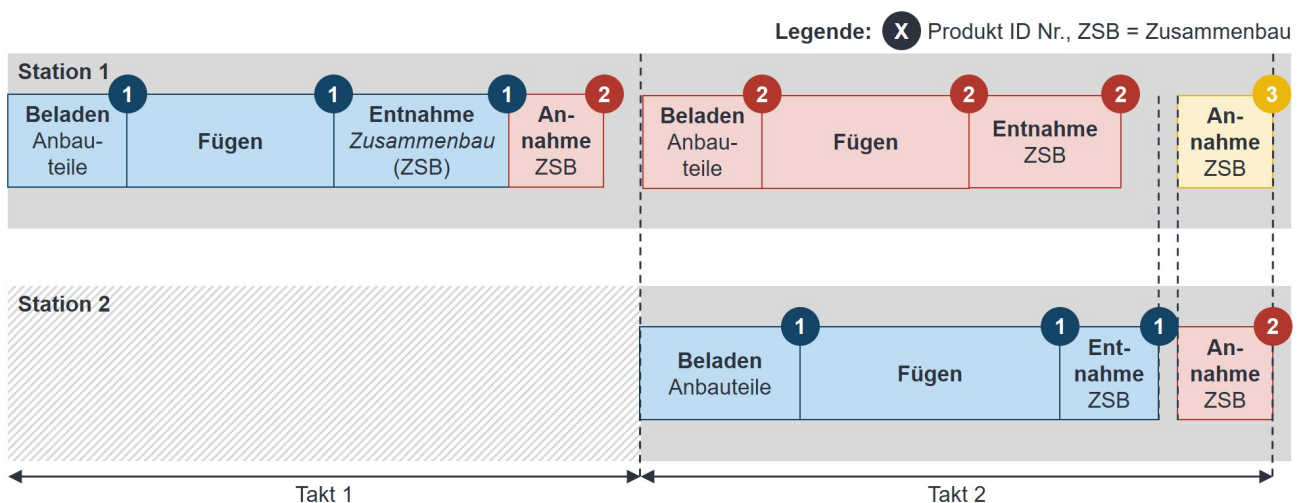


Abbildung 4.29: Visualisierung der Übergabe von Zwischenprodukten (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).

4.3.3.7 Abbildung mehrerer Zielgrößen

$$\min G_c = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (c_{\text{base}} \cdot v_{jk}) + \sum_{j \in J} (c_{\text{addRobot}} \cdot \alpha_j + c_{\text{handlR}} \cdot (\beta_j^R + \gamma_j^R) + c_{\text{handlH}} \cdot (\beta_j^H + \gamma_j^H) + c_{\text{addTC}} \cdot \delta_j) \quad (\text{C1})$$

$$\min G_a = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (a_{\text{base}} \cdot v_{jk}) + \sum_{j \in J} (a_{\text{addRobot}} \cdot \alpha_j + a_{\text{handlR}} \cdot (\beta_j^R + \gamma_j^R) + a_{\text{handlH}} \cdot (\beta_j^H + \gamma_j^H) + a_{\text{addTC}} \cdot \delta_j) \quad (\text{C2})$$

$$\max G_f = t^{\text{res}} \quad (\text{C3})$$

$$\min G_d = s + \sum_{i \in I^{\text{crit}}} \left(s - \sum_{j \in J} j \cdot f_{ij} \right) \quad (\text{C4})$$

$$\max G_m = -\lambda_c \cdot \frac{G_c}{G_c^*} - \lambda_a \cdot \frac{G_a}{G_a^*} + \lambda_f \cdot \frac{G_f}{G_f^*} - \lambda_d \cdot \frac{G_d}{G_d^*} \quad (\text{C5})$$

Wie in Abschnitt 4.3.2 kurz eingeführt und in Formel (C5) dargestellt wird die multikriterielle Zielfunktion basierend auf der Methode der Skalarisierung aus einem Gewichtungsvektor λ und den einkriteriellen Funktionen gebildet. Dadurch bleibt das vorgestellte Modell einfach erweiterbar. Im Folgenden wird kurz auf die modellierten Teilziele eingegangen:

Optimierung der Kosten (C1): Als priorisiertes Ziel beim ALB gilt die Minimierung der Kosten G_c . Diese werden maßgeblich durch die Stationen festgelegt, weshalb die Kategorisierung nach Boysen & Fliedner et al. (2007) für das SALBP die Minimierung der Stationen vereinfacht. Mit der hier abgebildeten Komplexität verschiedener Stationen steht jedoch die Kostenminimierung im Fokus. Dabei wird bei der Modellierung von einem Grundkosten-Anteil c_{base} und zusätzlichen Kosten für das ausgewählte Equipment ausgegangen. Das umfasst c_{addRobot} für einen zweiten Roboter, c_{handlR} oder c_{handlH} für die Handhabung durch Roboter bzw. Menschen und c_{addTC} für einen Drehtisch. Neben den Investitionskosten werden weiter die laufenden Betriebskosten der Linie in Betracht gezogen. Um die Linearität des aufgestellten Modells beizubehalten, wird angenommen, dass die Linie auf eine bekannte Betriebsdauer ausgelegt ist und damit die Kosten für diesen Zeitraum berechnet werden können. Damit lassen sich zeitbezogene Kostensätze (wie z. B. ein Stundenlohn) in zeitunabhängige Kosten umrechnen und die Zielfunktion linearisieren. In Bezug auf einen konkreten Anwendungsfall wird in Abschnitt 5.3 detaillierter auf die Kalkulation der Kostenkoeffizienten eingegangen.

Optimierung der Flexibilität (C2/C3): Die Flexibilität wird im vorgestellten Modell sowohl *global* als auch *lokal* bewertet. Darunter wird verstanden, dass die Flächenreserve G_a ein Indikator für die Flexibilität einer Fabrik und die Taktzeitreserve G_f ein Indikator für die Mengenflexibilität der Linie ist. Die Minimierung des Flächenbedarfs der Linie in (C2) ist identisch strukturiert zur Kostenfunktion (C1). Sämtliche Kostenkoeffizienten c (der Investitionskosten) können durch equipmentabhängige Flächenkoeffizienten a ersetzt werden (siehe Tabelle A3.2).

Die Maximierung der Taktzeitreserve t^{res} in (C3) ist ein konkurrierendes Ziel zur Minimierung der Kosten d. h. der Anzahl der Stationen G_c . Eine hohe Taktzeitreserve erlaubt bspw. das Abfangen von Nachfragespitzen. Aufgrund seines Gradienten (optimale Zielerreichung bei maximaler Anzahl an Stationen) wird dieses Zielkriterium G_f ausschließlich als Teil der multikriteriellen Optimierung eingeführt.

Optimierung der Qualität (C4): Die Qualität wird im vorgestellten Modell als Erfüllungsgrad der Toleranzanforderungen codiert. Hierzu werden besonders toleranzkritische Aufgaben I^{crit} von *normalen* Aufgaben unterschieden. Als Indikator für den Erfüllungsgrad wird der Zeitpunkt der Durchführung einer Aufgabe in Bezug auf die Position einer Station in der Linie gesehen. Das beruht auf der Annahme, dass toleranzkritische Aufgaben zum Ende der Linie durchgeführt werden sollten. Dadurch wird bspw. ein Verzug durch spätere Hitzeeinbringung vermieden und es können früher entstandene Toleranzabweichungen ausgeglichen werden. Hierzu wird die Binärvariable f_{ij} inkl. der Constraints (39) - (41) eingeführt. Sie nimmt für eine Aufgabe i den Wert 1 an, sobald die Aufgabe auf Station j vollständig bearbeitet wurde. Für die **Minimierung der Toleranzabweichungen** (engl. *deviations*) G_d wird schließlich die Differenz zwischen der letzten Station s und der fertigstellenden Station $j \cdot f_{ij}$ minimiert.

Optimierung der Ergonomie: In der Literatur wird die Ergonomie meist als Erschöpfung der Arbeiter abhängig von deren Belastung oder als Mindestanforderung an den Arbeitsplatz berücksichtigt (Boysen & Fliedner et al. 2007). Da sich die vorliegende Arbeit in die frühen Phase der Produktionssystemplanung eingliedert, ist eine detaillierte Beurteilung der Arbeitsabläufe unrealistisch. Weiter beschränkt sich die menschliche Tätigkeit beim ALBP auf die Handhabungsprozesse. Daher wird die Ergonomie hier als Mindestanforderung über das maximale Handhabungsgewicht m_{limit} eingeführt. Die Ergonomie ist daher ein Beispiel für ein Optimierungskriterium, welches als Randbedingung und nicht als Zielfunktion in das vorliegende Modell integriert wird. Für die Beladung limitiert Constraint (35) das Gewicht der Teile, die auf Station j beladen werden auf m_{limit} (außer $\beta_j^R = 1$ d. h. bei Verwendung eines Roboters). Für die Übergabe zwischen Stationen muss durch Constraint (36) zunächst das Gewicht der Zwischenprodukte am Ende der Bearbeitung durch eine Station berechnet werden. Constraint (37) limitiert analog zu (35) auch dieses Gewicht auf das Maximalgewicht m_{limit} (außer $\gamma_j^R = 1$). Diese Constraint darf weiter nur für eröffnete Stationen gelten, da sonst für alle noch nicht eröffneten Stationen Übergaberoboter geplant werden. Das stünde im Konflikt mit Constraint (42), weshalb der Big-M-Formulierung in (37) noch der Term $(+1 - v_{jk})$ hinzugefügt wird.

Multikriterielle Optimierung (C5): Die gewählte Methode zur Skalarisierung erlaubt eine Gewichtung der einkriteriellen Zielfunktionen. Dabei werden im Vergleich zur lexikographischen Optimierung und der Optimierung bei Zieldominanz weniger priorisierte Ziele

unter keinen Umständen ignoriert, sondern eine gewichtet optimale Lösung angestrebt. Für die Vergleichbarkeit der Teilziele werden diese normiert. Als Normierungskoeffizienten im Nenner werden jeweils die Optimalwerte bei einkriterieller Optimierung verwendet (Nickel & Rebennack et al. 2022). Die Gesamtzielfunktion G_m ist als Zielerreichungsgrad zu maximieren. Hierzu werden ursprünglich als Minimierungsproblem formulierte Ziele (Kosten G_c , Flächenbedarf G_a , Toleranzabweichung G_d) mit dem Faktor -1 multipliziert.

4.3.3.8 Erweiterungsmodell I – *coloring*-Algorithmus

Die Berücksichtigung unproduktiver Zeiten spielt für das vorliegende Problem eine große Rolle. Bei den Handhabungszeiten und explizit bei der Übergabe zwischen zwei Stationen hat die Anzahl der transportierten Teile einen Einfluss, welcher bisher nicht berücksichtigt wird. Bisher wird angenommen, dass die Teile in einer Halterung gemeinsam an die nachfolgende Station übergeben werden. Genauer betrachtet ist die Übergabe jedoch von dem Verhältnis zwischen der Anzahl beladener a_{in} und entladener Teile a_{out} abhängig: Beim Fügen ($k = 1$) gilt $a_{in} \geq a_{out}$ während beim Trennen ($k = 2$) $a_{in} \leq a_{out}$ gilt. Für bspw. Prüfprozesse ($k = 3$) gilt ergänzend $a_{in} = a_{out}$. Das erste Erweiterungsmodell soll nun den Einfluss noch unverbundener Zwischenprodukte explizit berücksichtigen und in die mathematische Modellierung mit aufnehmen. Hierzu wird das Problem in die Graphentheorie übertragen. Der modellierte Graph stellt die Bauteile als Knoten und die bereits existierenden Bauteilverbindungen als Kanten dar. Die Anzahl unverbundener Zwischenprodukte (im Folgenden Subteile genannt) entspricht so der Anzahl unverbundener Subgraphen. Um die Anzahl unverbundener Subgraphen zu bestimmen wird in der Graphentheorie meist das iterative Einfärben von Knoten und Kanten verwendet (Aigner 2015). Diese Grundidee wird durch den sog. *coloring*-Algorithmus umgesetzt. Dabei müssen zwei direkt miteinander verbundene Knoten (Teile) dieselbe Farbe besitzen. Die zum Beginn der Linie unverbundenen Teile besitzen verschiedene Farben und werden über den Zusammenbau sukzessive neu eingefärbt. Um die Anzahl vorhandener Subteile zu bestimmen, ist die Anzahl verschiedener Farben zu zählen.

Die hierfür eingeführten Variablen und Constraints können Anhang A3.2 entnommen werden. Da zwei Bauteile an mehreren Stellen verbunden werden können, gibt die Variable $c_{p_1 p_2 j}$ an, wie viele Verbindungen (z. B. Schweißnähte) zwischen den Teilen p_1 und p_2 vorliegen. Constraint (e01) legt fest, dass zwei Teile genau dann verbunden sind, wenn die zugehörige Aufgabe i auf der Station bearbeitet wird (angegeben in Matrix $L_{ip_1 p_2}$). In Bezug auf die betrachtete Station bedeutet das, wenn auf mindestens einer der vorherigen Stationen mindestens eine Verbindung hergestellt wird. Ob zwei Teile auf Station j verbunden sind oder nicht, wird über Constraint (e02) in Variable $cb_{p_1 p_2 j}$ gespeichert. Die Farbe eines (Sub-) Teils wird binär codiert: Bspw. nimmt $col_{p_1 j c}$ den Wert 1 an, wenn Teil p_1 auf Station j die Farbe c besitzt – andernfalls den Wert 0. Über Constraint (e04) wird erzwungen, dass zwei

verbundene Teile dieselbe Farbe besitzen ($cb_{p_1p_2j} = 1$). Dieser Farbwechsel eines Teils wird über die sog. *color changing part combination* (CCPC) ausgerückt, in Abbildung 4.30 dargestellt und liegt genau dann vor, wenn folgende 3 Kriterien erfüllt sind: p_1 muss auf der vorigen Station $j - 1$ die alte Farbe c_o besitzen UND p_2 muss auf der vorigen Station $j - 1$ die neue Farbe c_n besitzen UND die zwei Teile p_1 und p_2 müssen auf Station j als verbunden gelten d. h. $cb_{p_1p_2j} = 1$.

Die zugehörige Variable $ccpc_{p_1p_2c_0c_nj}$ besitzt fünf Indizes und verdeutlicht die Komplexität der Modellerweiterung. In den Constraints (e05) und (e06) wird diese Variable in Abhängigkeit der drei Kriterien definiert. Die Einschränkung $c_o < c_n$ führt eine Ordnungsrelation zwischen den Farben ein, um zu verhindern, dass eine CCPC in beide Richtungen existiert. Constraint (e07) setzt somit $ccpc_{p_1p_2c_0c_nj} = 0$ für alle $c_o \geq c_n$. Für den Farbwechsel von c_o zu c_n wird zudem die binäre Variable $change_{c_0c_nj}$ eingeführt. Sie nimmt nach Constraint (e08) und (e09) nur den Wert 1 an, wenn eine CCPC (p_1, p_2) vorliegt. Ergänzend stellt die Kontinuitätsconstraint (e10) sicher, dass ohne Farbwechsel alle Teile mit Farbe c_o weiterhin diese Farbe besitzen. Der eigentliche Farbwechsel an Station j wird über die Constraints (e11) bis (e14) abgebildet: Dazu gibt die Variable *change part color* (CPC) $cpc_{pj c_0 c_n}$ an, ob p auf j von Farbe c_o nach c_n wechselt. Constraint (e11) prüft, dass p auf $j - 1$ noch Farbe c_o besitzt (Kriterium 1). (e12) prüft analog den Farbwechsel (Kriterium 3) von c_o nach c_n über $change_{c_0c_nj} = 1$, während (e13) und (e14) diesen schließlich auf das Teil p übertragen ($cpc_{pj c_0 c_n} = 1$). In den Constraints (e15) bis (e17) wird ergänzend angegeben, welche Farbe ein Teil besitzen kann. Vor dem ersten Arbeitsschritt (Station $j = 0$) besitzen alle Teile ihre Ausgangsfarbe. Damit nimmt *color* (*col*) $col_{pj c}$ auf $j = 0$ für alle $p = c$ den Wert 1 an. Sonst (für alle $p \neq c$) nimmt $col_{pj c}$ den Wert 0 an. Danach kann ein Teil c_n nur besitzen, wenn auf der aktuellen Station ein Farbwechsel vorliegt ($change_{c_0c_nj} = 1$) oder es die Farbe c_n auf $j - 1$ bereits besitzt. Abbildung 4.30 visualisiert ein Beispiel der Variablenbelegung, wenn zwei Subteile auf Station $j = 2$ verbunden werden.

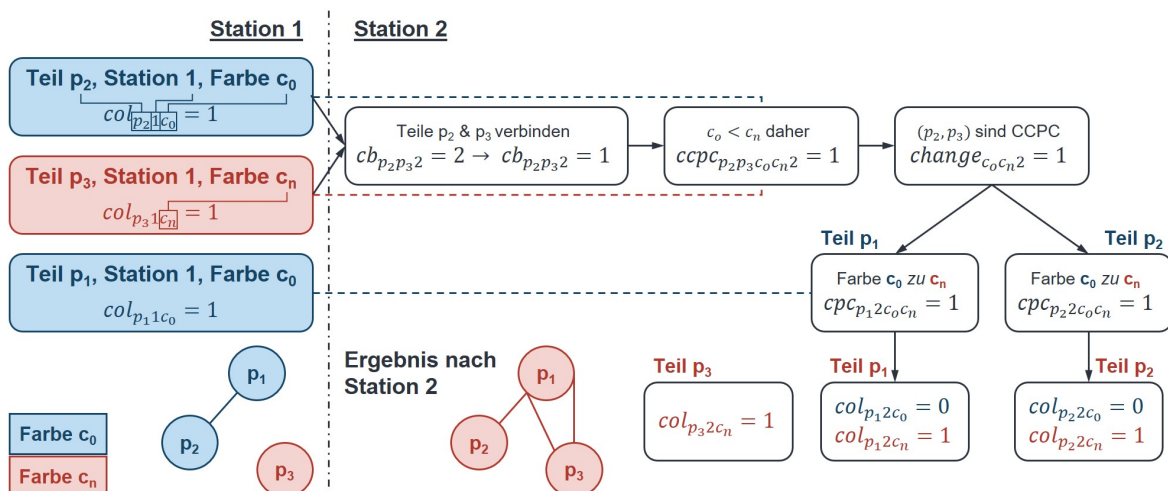


Abbildung 4.30: Beispiel der Variablenbelegung des Erweiterungsmodells beim Verbinden zweier Bauteile (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).

In den Constraints (e18) bis (e22) werden ergänzend die existierenden Farben an einer Station bestimmt. Zur Feststellung, ob Teile einer bestimmten Farbe bereits beladen sind, wird die sog. *loaded part color* Variable $lpc_{pj c}$ eingeführt. Durch (e18) und (e19) darf $lpc_{pj c} = 1$ nur gelten, wenn das Teil p auf j die Farbe c besitzt und p auf j oder einer vorausgehenden Station beladen wird. Durch (e20) und (e21) darf analog für die *existing color* $ec_{cj} = 1$ nur gelten, wenn für mindestens ein Teil p $lpc_{pj c} = 1$ gilt. In Constraint (e22) wird schließlich die Anzahl existierender Farben an Station j in der Variable s_j gespeichert, indem über die binäre Variable ec_{cj} aufsummiert wird. Am Ende der Linie muss $s_j = 1$ gelten. Damit für alle nicht eröffneten Stationen $s_j = 0$ gilt, wird der Term $(1 - \sum_{k \in K} v_{jk})$ abgezogen. (e23) bis (e31) definieren die zulässigen Wertebereiche.

4.3.3.9 Erweiterungsmodell II – Stationsinternes Scheduling

Im vorgestellten ALB Modell wird anhand der Constraint (13) und ergänzend (14) - (17) der Vorranggraph eingehalten, indem zwei Aufgaben, zwischen denen eine Abfolgerestriktion besteht, nicht derselben Station zugeordnet werden können. Die zweite Modellerweiterung lockert diese Bedingung und erlaubt die Zuordnung einer Nachfolger-Aufgabe zur Station der Vorgänger-Aufgabe, sofern diese auf der betrachteten Station vollständig bearbeitet wird. Das ist in der neu eingeführten Constraint (13–II) festgehalten. Die Constraints (14) und (15) fallen weg. In den Constraints (16) und (17) ist lediglich die Aufsummierung über h anzupassen.

$$(1 - P_{mn}) + z_{mj} \geq \sum_{h=1}^j \sum_{k \in K} x_{nhk} \quad \forall m, n \in I, j \in J \quad (13-II)$$

$$z_{ij} \leq \sum_{h=1}^j \sum_{k \in K} x_{ihk} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (16-II)$$

$$1 - z_{ij} \leq M \cdot \left(1 - \sum_{h=1}^j \sum_{k \in K} x_{ihk} \right) \quad \forall i \in I, j \in J \quad (17-II)$$

Diese Modellerweiterung II erfordert ein stationsinternes Scheduling der zugewiesenen Aufgaben, um die Zugänglichkeit und Kollisionsfreiheit der Roboter sicherzustellen. Bei der in dieser Arbeit betrachteten Grobplanung sind vor allem die resultierenden Planzeiten relevant. Aus diesem Grund werden vereinfachend die einer Station zugewiesenen Aufgaben lediglich entlang des Vorranggraphen sortiert, um zulässige Lösungen zu erzeugen.

4.4 Visualisierung und Simulation des Produktionssystems

Die Aufgabe der variantenspezifischen Grobplanung ist an dieser Stelle abgeschlossen. Unter der Berücksichtigung von Produktähnlichkeiten (Schritt 1, FF1, Kapitel 4.1) wird zunächst ein betriebsmittelunabhängiger Prozessvorranggraph abgeleitet (Schritt 2, FF2, Kapitel 4.2) und anschließend die betriebsmittelbezogene Stationszuordnung optimiert (Schritt 3, FF3, Kapitel

4.3). Das Ergebnis liegt zu diesem Zeitpunkt als abstrakt beschriebenes, parametrisiertes Produktionssystem vor (siehe Abbildung 4.31 *links*). Dieser vierte Schritt verfolgt nun das ergänzende Ziel, das vorliegende Planungsergebnis als digitales (Simulations-) Modell, das mit der Lösung aus Schritt 3 automatisch konfiguriert wird, dem Anwender zur weiteren Nutzung zur Verfügung zu stellen. Dadurch werden drei zentrale Aspekte adressiert: Erstens wird der vorgestellte Ansatz so in die bestehenden Planungsprozesse integriert und knüpft nahtlos an nachfolgende Planungsaufgaben an. Zweitens wird durch das für den Menschen nutzbare, digitale Modell die Akzeptanz des vorgestellten Ansatzes beim Anwender erhöht. Drittens kann das digitale Modell aus der Planung heraus später als digitaler Schatten über die Inbetriebnahme bis hin zum digitalen Zwilling während dem Betrieb des Produktionssystems hinweg genutzt werden (vgl. Abbildung 2.15). Die grundlegende Idee dieses vierten, ergänzenden Schritts ist in Abbildung 4.31 dargestellt. Basierend auf zuvor definierten Parametern soll die Konfiguration der Simulation automatisch initialisiert und damit das optimierte Produktionssystem in einem digitalen Modell dargestellt werden (vgl. *FF4*).

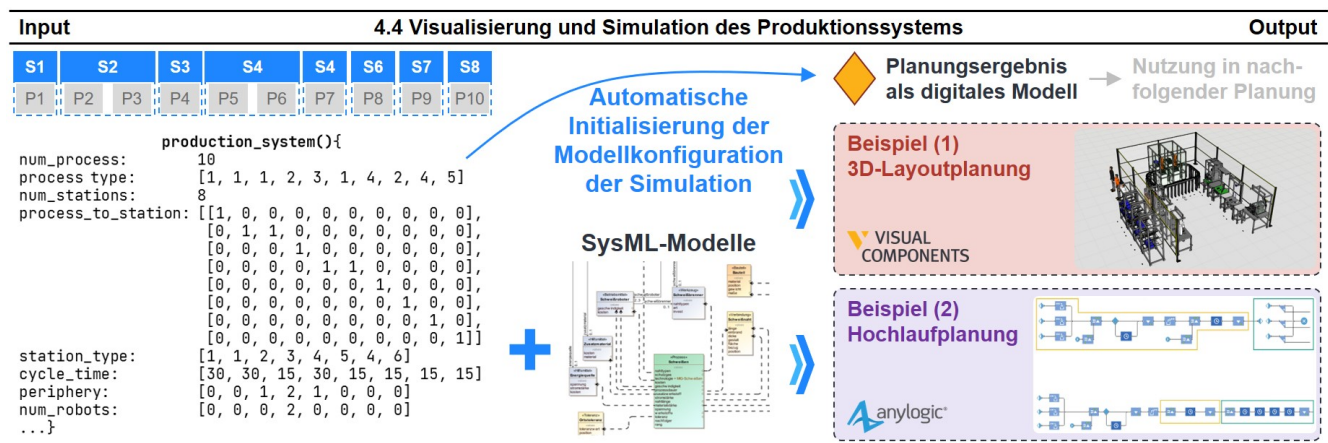


Abbildung 4.31: Vorgehen zur Visualisierung und Simulation (eigene Darstellung).

Das zugehörige allgemeine, methodische Vorgehen nach Schäfer & Klenk et al. (2024) ergänzt die VDI 3633 (2014) und wird in Abbildung 4.32 vereinfacht sequenziell visualisiert. Die Phasen werden iterativ durchlaufen. Aufgrund der vielseitigen Möglichkeiten zur Nutzung des digitalen (Simulations-) Modells ist zunächst eine **Ziel- und Aufgabendefinition [1]** durchzuführen. Dabei werden Ziele, Umfang und die erwarteten Ergebnisse inkl. messbarer *Key Performance Indicators* (KPIs) zur Quantifikation der Ergebnisse festgelegt. Das beeinflusst die Aktivitäten der nachfolgenden Phasen. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wird auszugsweise auf zwei exemplarische Aufgaben der Detailplanung eingegangen, die jeweils von einem digitalen Modell profitieren. Die erste Aufgabe umfasst die dynamische **Layoutplanung** mittels modularer 3D-Simulation. Dabei soll im Vergleich zu einer statischen Planung des Layouts (z. B. mit PowerPoint) die 3D-Simulation den Planer dabei unterstützen, die Auswirkungen einer Layoutänderung auf die Linie und bspw. deren Ausbringung zu unter-

suchen. Als weitere Aufgabe wird die **Hochlaufplanung** des Produktionssystems betrachtet. Hierbei soll eine dynamische Ablaufsimulation zur Identifikation von Skalierungspfaden für den Produktionshochlauf verwendet werden. Die folgende Beschreibung der Phasen nach Abbildung 4.32 erfolgt anhand dieser beiden Beispiele.

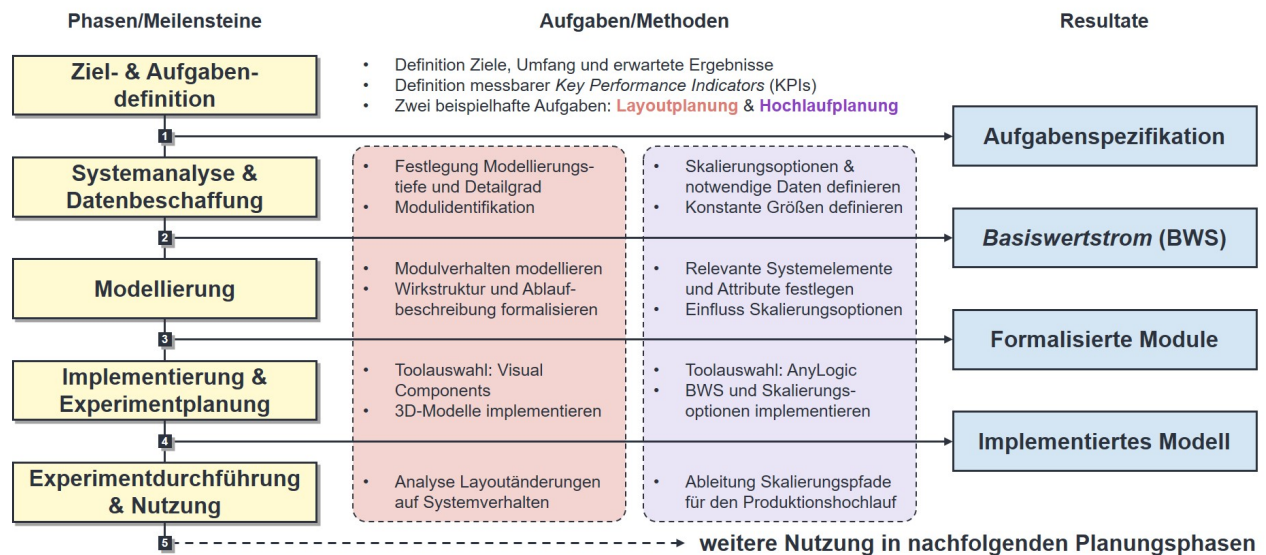


Abbildung 4.32: Lösungsansatz als sequenzielles Phasen-Meilenstein-Diagramm (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer & Klenk et al. 2024).

Im Rahmen der **Systemanalyse und Datenbeschaffung [2]** werden die Systemgrenzen des Modells definiert und die für die Modellierung notwendigen Daten bereitgestellt. Der Aspekt der Modularisierung spielt hierbei eine große Rolle, wie es die beiden Beispiele verdeutlichen. In beiden Fällen bildet das Ergebnis der vorausgehenden Optimierung den sog. *Basiswertstrom* (BWS)¹. Dieser ist durch geeignete Module abzubilden. Die Grundlage hierfür stellt das SysML-Produktionssystemmodell aus Kapitel 4.2 zur Verfügung.

Im Bezug auf die 3D-Simulation des Produktionssystems zur **Layoutplanung** ist zunächst die Modellierungstiefe festzulegen. Hierfür eignet sich der erweiterte morphologische Kasten aus Tabelle 2.2. Durch eine Kombination spezifischer Merkmalsausprägungen kann der Detaillierungsgrad des Simulationsmodells gewählt werden.

Für die **Hochlaufplanung** sind sog. Skalierungsoptionen zur Dimensionierung des Produktionssystems zu definieren. Grundlage dafür ist der BWS, der über den Verlauf des Produktionshochlaufs durch die modulare Ergänzung von Systemelementen hochskaliert werden soll. Beispiele für Skalierungsoptionen sind der Automatisierungsgrad, das Schichtmodell oder die Anzahl der Mitarbeiter (Schäfer & Klenk et al. 2024). Weitere sind in Abbildung A4.1

¹ Unter einem Basiswertstrom wird in dieser Arbeit der Output der Optimierung in Schritt 3 und damit die Grundlage (i. A. Basis) der Visualisierung und Simulation in Schritt 4 des eigenen Ansatzes verstanden. Der Basiswertstrom enthält folglich die im Rahmen des ALB optimierte Linienkonfiguration, besitzt jedoch keine Informationen über das Layout (Gegenstand der Layoutplanung) und keine aktivierten Skalierungsoptionen (Gegenstand der Hochlaufplanung).

dargestellt. Analog zu den variablen Größen, die durch die Skalierungsoptionen beeinflusst werden, sind konstante Modellparameter zu bestimmen.

Die Phase der **Modellierung [3]** umfasst alle Aktivitäten zur zielgerechten Abbildung der Systemelemente und deren Komponenten. Das erfordert eine formale Beschreibung der Module. Die Struktur für die 3D-Modelle zur **Layoutplanung** wird durch den Anlagenbaukasten aus Kapitel 4.2 vorgegeben. Die SysML-Profile enthalten ein Regelwerk zulässiger Modulkombinationen, die ebenfalls die Stationstypen der Optimierung in Kapitel 4.3 definieren. Diese Module werden nun zusätzlich als dynamische 3D-Bausteine modelliert. Dabei sind die IT-Elemente zu ergänzen, die das Verhalten der Ressourcen und deren Schnittstellen definieren (siehe Abbildung 4.33). Für die Formalisierung der Wirkstruktur eignet sich die Spezifikationstechnik CONSENS (Gausemeier & Brandis et al. 2012). Analog können für die Spezifikation einer Simulationswerkzeug-unabhängigen Ablaufbeschreibung GRAFCET-Diagramme verwendet werden (DIN EN 60848 2014).

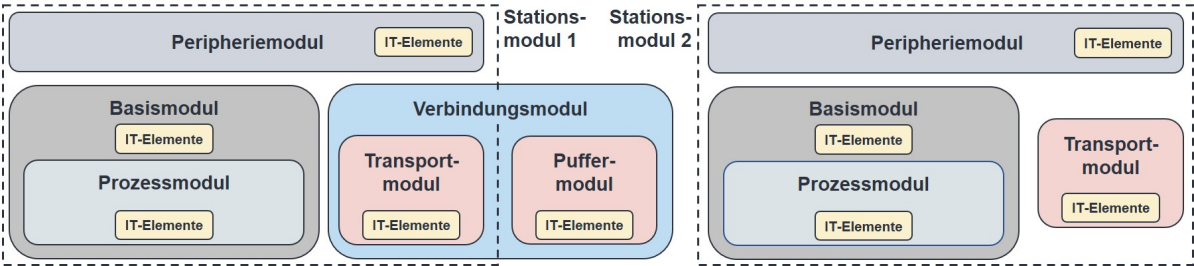


Abbildung 4.33: Modularisierung am Beispiel zweier Stationen (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).

Um für die **Hochlaufplanung** den BWS und die zugehörigen Skalierungsoptionen zu modellieren, müssen die dafür relevanten Systemelemente (z. B. Ressourcen, Puffer etc.) und deren Attribute (z. B. Automatisierungsgrad, Kapazität etc.) spezifiziert werden. Weiter ist festzulegen, welchen Einfluss die auszuwählenden Skalierungsoptionen auf die modellierten Systemelemente nehmen. Diese Wechselwirkungen werden auszugsweise in Tabelle 4.5 dargestellt. Die zunächst parallel zum BWS modellierten Skalierungsoptionen können so integriert und über definierte Parameter aktiviert werden.

Tabelle 4.5: Skalierungsoptionen und deren Einfluss nach Schäfer & Klenk et al. (2024) basierend auf Kampker & Schuh et al. (2011) und Eilers (2015).

Skalierungsoptionen	Linie	Station	Ressource allg.
Automatisierungsgrad		X	X
Vormontage	X	X	X
Aufteilung von Stationen	X	X	X
Schichtmodell			X
Anzahl Mitarbeiter			X
Anzahl Stationen			X

Die **Implementierung und Experimentplanung [4]** befasst sich mit der Simulationswerkzeug-bezogenen Vorbereitung der Nutzung. Zunächst sind hierfür simulationsrelevante Rahmenbedingungen wie z. B. die zu simulierende Zeitperiode oder die Anzahl der Wiederholungen (bei stochastischen Einflüssen) zu definieren. Diese beeinflussen die Wahl eines geeigneten Softwaretools. Anschließend werden die zuvor modellierten Systemelemente in der ausgewählten Simulationsumgebung implementiert. Weiter wird ausgehend vom BWS geplant, welche Modifikationen (z. B. Layoutänderung oder Hinzunehmen einer Skalierungsoption) im Rahmen der Experimentdurchführung auf ihren Einfluss geprüft werden sollen.

Die **Layoutplanung** einer Linie in der digitalen Fabrik profitiert von einem hohen Detailgrad und einer dreidimensionalen Darstellung. Gleichzeitig ist jedoch die Abbildung einer längeren Zeitperiode zur Analyse langfristiger Auswirkungen weniger relevant. Hierfür eignet sich bspw. die Software Visual Components. Bei der 3D-Modellierung kann auf einen umfassenden Standardkatalog zugegriffen und individuelle Module inkl. beweglicher Freiheitsgrade umgesetzt werden (vgl. Abbildung 4.34). Dabei ist auf eine modulare Verkettung der Stationen zu achten, damit das Produktionssystem für die Simulationsexperimente einfach über zuvor definierte Parameter konfiguriert werden kann.

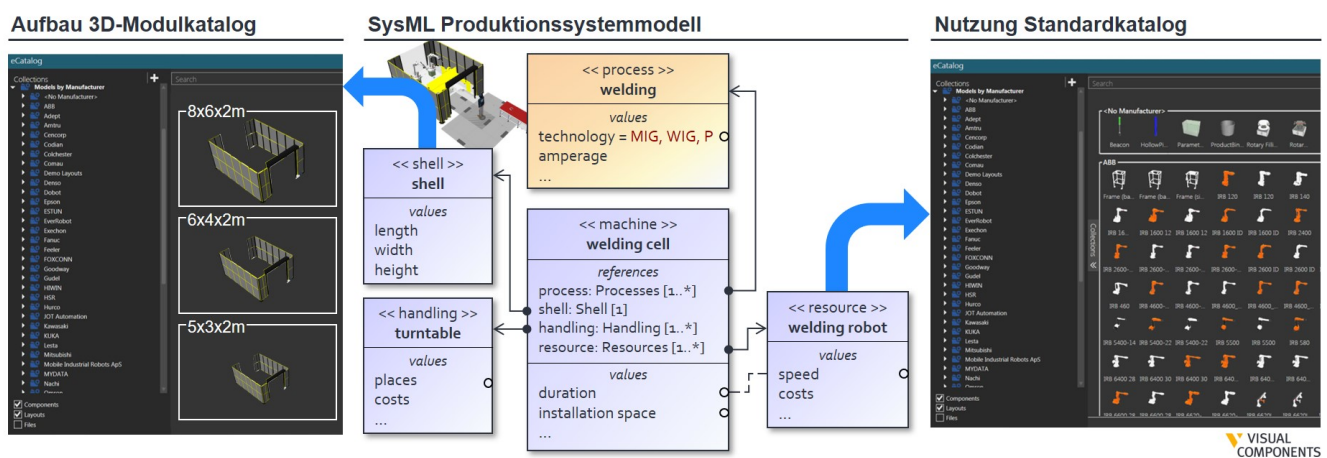


Abbildung 4.34: Implementierung eines 3D-Modulkatalogs in Visual Components (eigene Darstellung).

Der **Produktionshochlauf** erstreckt sich über einen längeren Zeitraum mehrerer Tage bis Monate (Schäfer & Klenk et al. 2024). Hierbei sind detaillierte Einflüsse der Skalierungsoptionen zu simulieren. Für eine solche Anwendung eignet sich bspw. die Software AnyLogic. Wie damit die Simulationsumgebung strukturell aufgebaut werden kann und welche Parameter variiert werden ist in Abbildung A4.2 bzw. Abbildung A4.3 im Anhang A4 dargestellt.

Die letzte Phase der **Experimentdurchführung und Nutzung [5]** thematisiert die Anwendung des implementierten Modells. Zunächst kann im Sinne der FF4 das Planungsergebnis (in Form zuvor definierter Parameter – vgl. Abbildung 4.31 links) durch die implementierten

Produktionsmodule als digitales (Simulations-) Modell initialisiert und dargestellt werden. Dieses digitale Modell kann durch den Anwender bearbeitet und in nachfolgenden Planungsphasen bis hin zum realen Betrieb der Produktion vielseitig genutzt werden.

Neben der Analyse der Auswirkungen von **Layoutänderungen** im Rahmen von Simulationsexperimenten bietet die 3D-Simulation eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Nutzung des digitalen Modells. So können bspw. die im Rahmen der Grobplanung getroffenen Annahmen und Vereinfachungen detaillierter betrachtet werden. Ein konkretes Beispiel ist die Roboterbahnplanung zur Ermittlung verlässlicher Prozesszeiten im Vergleich zur bisherigen Abstraktion des Zusammenhangs zwischen Schweißnahtlänge, Schweißgeschwindigkeit und Prozessdauer.

Aus den simulierten **Hochlaufszszenarien** unter Hinzunahme verschiedener Skalierungsoptionen lassen sich schließlich die Skalierungspfade ableiten, die für den realen Hochlauf in Betracht gezogen werden sollten. Die Skalierungspfade beschreiben, welche Systemkonfiguration zu welchem Zeitpunkt die beste darstellt. Diese Auswahl basiert auf der Bewertung und Analyse der berechneten KPIs (z. B. Stückkosten) im Rahmen der Experimentdurchführung.

Das Ergebnis des vorgestellten Ansatzes zur assistierten Produktionssystemplanung ist damit ein vielseitig einsetzbares, digitales Modell des variantenspezifischen Produktionssystems. Dieses Ergebnis ...

- FF1 berücksichtigt Ähnlichkeiten zwischen der neu angefragten und bereits produzierten Produktvarianten abhängig von der vorliegenden Produktcharakteristik und -repräsentation.*
- FF2 berücksichtigt nicht explizit modellierte Metadaten und personengebundenen Erfahrungswissen als PPR-Wechselwirkungen bei der betriebsmittelunabhängigen Ableitung des Prozessvorranggraphen.*
- FF3 berücksichtigt diese Vorrangbeziehungen bei der multikriteriellen Optimierung des Produktionssystems durch eine betriebsmittelbezogene Zuordnung von Aufgaben zu Stationen im Sinne des neu entwickelten ALB Modells.*
- FF4 berücksichtigt die Integration in nachfolgende Planungsschritte durch eine einfache Initialisierung als digitales (Simulations-) Modell anhand zuvor festgelegter Parameter.*

Im folgenden Kapitel 5 wird der präsentierte Ansatz dieser Forschungsarbeit am Beispiel der variantenspezifischen Produktionssystemplanung eines Automobilzulieferers angewandt und die Ergebnisse der Anwendung vorgestellt.

5 Anwendung und Ergebnisse

Dieses Kapitel verfolgt das Ziel der Anwendung des zuvor präsentierten eigenen Ansatzes im Rahmen des vom BMBF öffentlich geförderten Verbundprojekts MoSyS (02J19B099). Hierbei wird die variantenspezifische Produktionssystemplanung bei einem *Tier 1 Automobilzulieferer* betrachtet. Das global tätige Unternehmen mit Hauptsitz in Deutschland verzeichnet im Jahr 2023 mit seinen weltweit rund 23.000 Mitarbeitern einen Umsatz von knapp 9 Milliarden Euro und verfügt über 73 Produktionsstandorte in 26 Ländern. Im Automotive Sektor ist der Zulieferer besonders in den Bereichen Strukturteile, Chassis und Fahrwerkskomponenten tätig. Das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete **Produkt** ist die Verbundlenkerachse (RTB von engl. *Rear Twist Beam*). Hiervon werden beim betrachteten Zulieferer pro Jahr insgesamt ca. 8 Mio. Achsen bei einem Jahrespeakvolumen von max. 300.000 Achsen je Kunde hergestellt. Die Produktion der spezifischen RTB Kundenvarianten erfolgt meist nach dem sog. *build to print* Prinzip. Hierbei hat der Kunde – in diesem Fall der *Original Equipment Manufacturer* (OEM) – eine erste gestalterische Entwicklung des Produkts bereits vorgenommen. Die nachfolgende **Planungsaufgabe** des Zulieferers umfasst zunächst die Analyse der angefragten Kundenvariante, die Identifikation der notwendigen Prozessschritte sowie die Austaktung des Produktionssystems. Im Allgemeinen umfasst die Herstellung eines RTB sowohl die Teilefertigung (z. B. Pressen) der Blechbiegeteile als auch die Montage (z. B. Verschweißen) sowie das Lackieren und Endbearbeiten der Baugruppe. Ersteres und letzteres wird variantenübergreifend mit zentral verfügbaren Ressourcen (z. B. Presswerk, Lackierstraße etc.) durchgeführt. Der Fokus der Planung liegt daher auf der Optimierung der variantenspezifischen, hochautomatisierten Produktionslinie (siehe Abbildung A5.1 in Anhang A5). Diese umfasst primär Trenn- (Laserschneiden), Füge- (Schweißen), und Prüfprozesse. Eine Wertstromanalyse des betrachteten Bereichs kann Abbildung A5.2 entnommen werden. Aufgrund heterogener Systeme und stark manueller Aktivitäten ist die Planung beim Zulieferer komplex und zeitintensiv. Das motiviert die Anwendung des eigenen Ansatzes zur assistierten Produktionssystemplanung, welche im folgenden schrittweise beschrieben wird.

5.1 Produktanalyse zur Prozessplanung

Der erste Schritt befasst sich mit der Analyse der vom OEM zur Verfügung gestellten Produktinformationen. CAD-Dateien und Stücklisten werden verwendet, um die zu produzierenden Features und vorhandenen Bauteilvarianten zu identifizieren. Hierzu sollen Ähnlichkeiten zwischen den verschiedenen Kundenvarianten verwendet werden. Aus diesem Grund wird das Beispiel der Verbundlenkerachse zunächst genauer eingeführt. Solche Achsen werden im Vergleich zur Einzelradaufhängung aus Gewichts-, Bauraum und Kostenvorteilen insbesondere bei Kleinwagen mit Frontantrieb eingesetzt (Heißing & Ersoy et al. 2013).

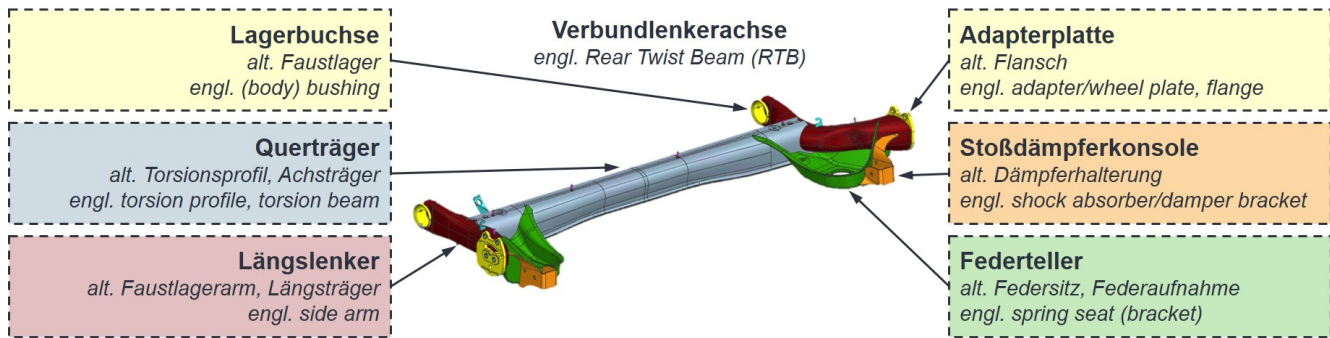


Abbildung 5.1: Grundelemente einer Verbundlenkerachse (eigene Darstellung).

Die Achse ist das zentrale Verbindungselement zwischen Chassis, Fahrwerk und Radträger. Hierzu besteht die symmetrische Baugruppe (neben weiteren Bauteilen) aus den in Abbildung 5.1 dargestellten, funktionsbestimmenden Hauptkomponenten. Obwohl jeder RTB die funktional gleiche Aufgabe erfüllt, ist deren Gestalt aufgrund des bereits erwähnten *build to print* Prinzips je nach Kundenauftrag verschieden. Das motiviert die Analyse dieser Diversität und den datengetriebenen Aufbau eines Baukastens aus Sicht des Zulieferers. Die grundlegenden Freiheitsgrade einer Verbundlenkerachse inkl. der Kontaktpunkte zu Rad (Flansch) und Chassis (Feder und Lagerbuchse) sind in Abbildung 5.2 visualisiert.

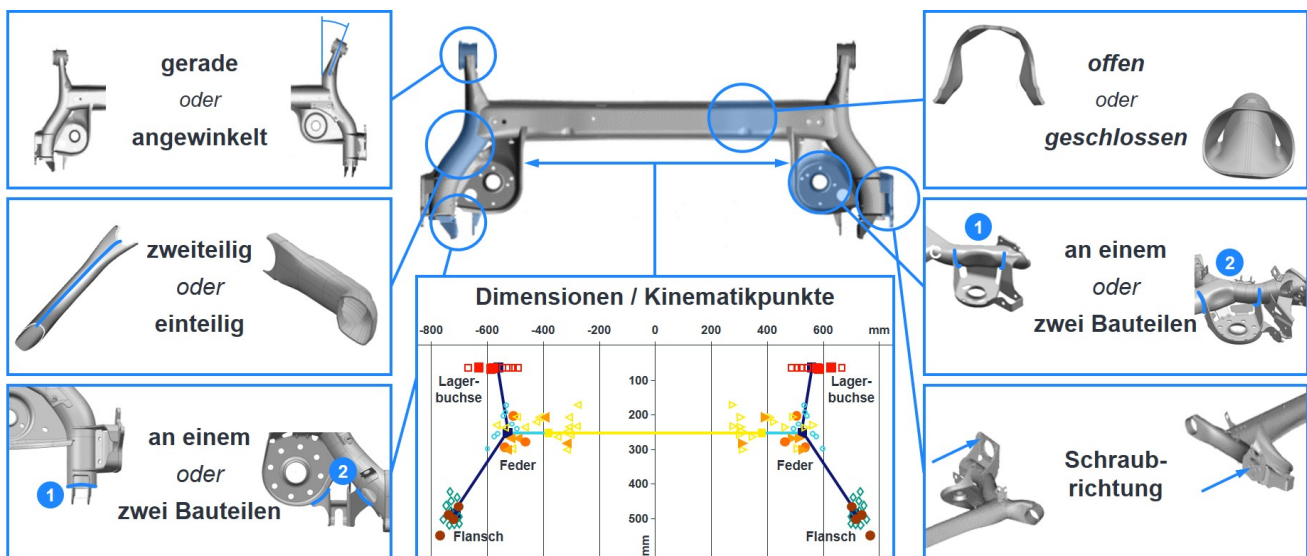


Abbildung 5.2: Freiheitsgrade einer Verbundlenkerachse (eigene Darstellung).

Um diese Ähnlichkeiten zu identifizieren, werden im Folgenden die in Abschnitt 4.1.2 vorgestellten Ansätze angewandt. Nach dem Auswahl-schema in Abbildung 4.9 eignen sich im vorliegenden Anwendungsfall besonders die manuelle und semantische Analyse sowie die Analyse geometrie-schreibender Merkmale. Letztere beide werden kombiniert betrachtet. Zur lokalen Analyse von Ähnlichkeiten werden QUICCI Deskriptoren verwendet. Für die Anwendung von Autoencodern zur Analyse von Punktwolken wird der verhältnismäßig kleine Datensatz von 60 Bauteilen synthetisch erweitert.

5.1.1 Manuelle Analyse

Die strukturierte, manuelle Analyse einer neu erhaltenen Kundenanfrage stellt den aktuellen Status Quo beim betrachteten Zulieferer dar. Hierzu werden die historisch bekannten, relevanten Merkmale eines RTB (z. B. die Bauteilvarianten aus Abbildung 5.2) in einem morphologischen Kasten gespeichert. Dieser dient als digitale Excel-Checkliste bei der Analyse. Der Anwender gleicht die vorliegenden Produktinformationen mit den Merkmalsausprägungen des morphologischen Kastens ab und erfasst so strukturiert die Charakteristik der neu angefragten Kundenvariante. Neben der Identifikation vorhandener Bauteilvarianten erlaubt ein solcher Vergleich von Dimensionen, Kinematikpunkten, Anzahl Features, Baugruppengewicht oder Gesamtschweißnahtlänge bereits eine erste grobe Abschätzung der Fertigungskosten über die ähnlichste, bereits produzierte RTB-Variante. Die manuelle Analyse ist zwar besonders flexibel, gleichzeitig jedoch ebenso aufwändig. Weiter findet keine Externalisierung des für den ähnlichkeitsbasierten Abgleich notwendigen Erfahrungswissens statt.

5.1.2 Analyse geometriebeschreibender Merkmale

Für die Analyse geometriebeschreibender Merkmale wird zunächst ein eigenes Tool zur Extraktion der Merkmale entwickelt. Dieser nutzt das Java *Application Programming Interface* (API) von PTC Creo¹, um neben dem Bauteilbezeichner insgesamt 18 relevante Merkmale (Auswahl siehe Tabelle 4.1) je Bauteil zu extrahieren. Das API ermöglicht eine parallele Extraktion aus mehreren CAD-Dateien, während das Tool die extrahierten Daten als Abstraktion der Bauteilgeometrie automatisch in einem standardisierten csv-Format speichert. (Schäfer & Tremel et al. 2023) Das stellt die Datengrundlage für das **Clustering** der Bauteile dar. Hierfür bieten Low-Code Plattformen wie z. B. KNIME² die Möglichkeit einer einfachen Implementierung anhand grafischer Workflows (siehe Abbildung 5.3).

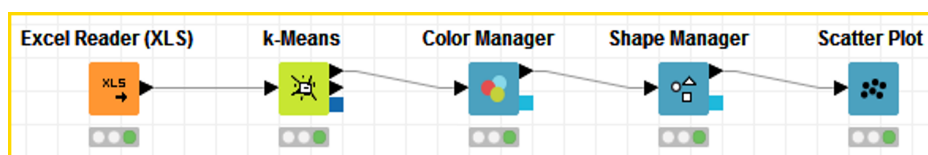


Abbildung 5.3: Einfacher KNIME-Workflow zum Clustering der Bauteile (eigene Darstellung).

Das Ergebnis des *k-means* Clustering eines Datensatzes von 60 Bauteilen kann Anhang A6.1 entnommen werden. Es wird ersichtlich, dass es geeignete und weniger geeignete Kombinationen von Merkmalen zur Isolation einzelner Bauteilgruppen gibt. Wie in Tabelle 5.1 dargestellt, erreicht bereits die Verwendung der Bauteilabmessungen allein eine *Accuracy* von 93,3 %. Für die **Klassifikation** neuer Bauteile eignen sich die KNIME-Knoten Entscheidungsbaum und Random Forest. Die *Accuracy* von 100 % suggeriert jedoch eine Überanpassung

¹ <https://www.ptc.com/en/products/creo> (besucht am: 01.10.2024)

² <https://www.knime.com/> (besucht am: 01.10.2024)

(engl. *overfitting*) der erlernten Zusammenhänge an den kleinen Datensatz. Das verdeutlicht die Grenzen dieses Ansatzes. Über eine Kombination der Analyse von geometriebeschreibenden Merkmalen und der semantischen Analyse (vgl. Kapitel 4.1.2) des Bauteilbezeichners („Spring Seat“ und „Federaufnahme“ sind beides Bauteile der Klasse „Federteller“) können alle Bauteile korrekt zugeordnet werden (Schäfer & Tremel et al. 2023). Trotzdem werden mit dem Detailgrad dieser Analyse Bauteile nur als solche erkannt und keine spezifischen Bauteilvarianten identifiziert (vgl. Abbildung 5.2 bspw. offener oder geschlossener Querträger).

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Analyse in Schäfer & Tremel et al. (2023).

Clustering	Merkmale	Accuracy	
k-means (mit kNN)	x, y, z	93,3 %	
PCA & k-means (mit kNN)	x, y, z, V, S, m, ρ	66,6 % ¹	
Klassifikation	Merkmale	80/20 Training/Test ²	70/30 Training/Test ²
Entscheidungsbaum ³	Alle	83,3 %	94,4 %
Random Forest ⁴	Alle	100 %	83,3 %
Support Vector Machine	Alle	33,3 %	72,2 %

¹ Zu viele Merkmale für kleinen Datensatz, ² Verhältnis Trainings- und Testdaten, ³ Gini Index mit *Pruning*, ⁴ *Information Gain Ratio*

5.1.3 Autoencoder zur Analyse von Punktwolken

Für eine detailliertere Analyse der 3D-Gestalt von Bauteilen eignet sich die Verarbeitung von Punktwolken mittels Autoencoder. Ein trainierter Encoder erzeugt auf Basis einer Punktwolke eine hinreichend äquivalente, latente Darstellung des Inputs. Das Training eines Autoencoders erfordert jedoch große Datenmengen. Krahe (2023) z. B. untersucht mit diesem Ansatz die Ähnlichkeit zwischen insgesamt 957 volumetrischen Einzelbauteilen aus 5 Bauteilklassen. Aus diesem Grund wird der vorliegende Datensatz wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben synthetisch erweitert. Hierzu werden die in Abbildung 5.2 dargestellten Freiheitsgrade verwendet, um weitere Bauteile für die 6 Grundelemente aus Abbildung 5.1 zu erzeugen. Der folgende Python-Code zeigt das am Beispiel der Lagerbuchse.

```

1 import bpy
2 class BodyBushingSettings(bpy.types.PropertyGroup):
3     radius: bpy.props.FloatProperty(name="radius", default=20, min=10, max=30)
4     thickn: bpy.props.FloatProperty(name="thickness", default=3, min=1, max=5)
5     length: bpy.props.FloatProperty(name="length", default=50, min=40, max=60)

```

Programm Code 5.1: Erzeugung synthetischer Trainingsdaten.

Ziel der synthetischen Daten ist es, das Training des Autoencoders robuster zu machen. Es ist jedoch anzumerken, dass die realen Bauteile in ihrer Gestalt sehr detailliert und komplex sind, wobei die synthetisch generierten Bauteile aus geometrischen Grundformen bestehen. Dieser Effekt wird gleichzeitig durch die Unschärfe der Abbildung einer Punktwolke gedämpft.

Zur Erzeugung der Punktwolken wird ein Python-Script entwickelt, das basierend auf den STL-Dateien der Bauteile die Punkte erstellt und deren dreidimensionale Koordinaten speichert. Neben der Anzahl der Punkte kann für die Verteilung der Punkte zwischen der flächenbasierten, Poisson-verteilten und der fusionierten Umwandlung gewählt werden (siehe Anhang A6.2.1). Vergleiche zeigen, dass besonders letztere Kanten gut abbildet und daher bei flächigen Bauteilen geeigneter ist. Ein exemplarisches Ergebnis der fusionierten Umwandlung kann Abbildung 5.4 entnommen werden.

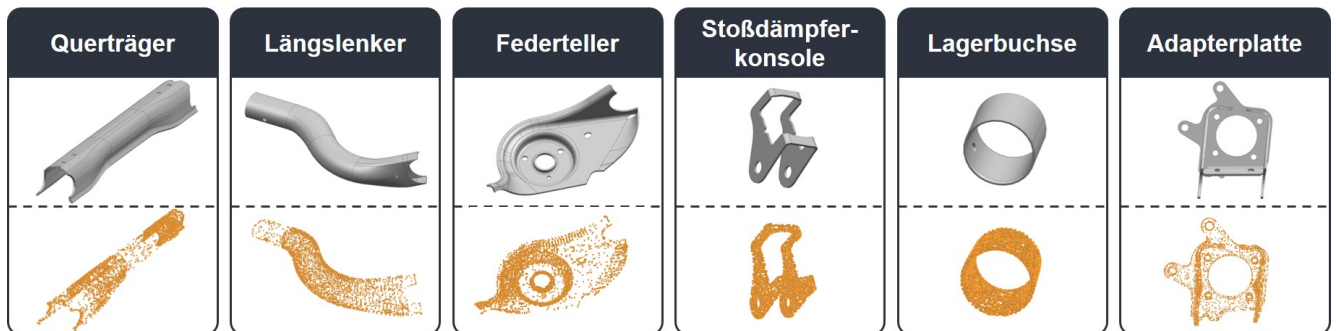


Abbildung 5.4: Fusionierte Erzeugung der Punktwolken für 6 Klassen (eigene Darstellung).

Die für das Training des Autoencoders gewählte Architektur und Hyperparameter können Anhang A6.2.2 entnommen werden. Das Ergebnis der latenten Vektoren kann wie in Abbildung 5.5 mit dem t-SNE Verfahren nach van der Maaten & Hinton (2008) visualisiert werden. In der dimensionslosen Darstellung des latenten Raums repräsentieren zwei benachbarte Punkte zwei ähnliche Vektoren bzw. Bauteile. Die Farbe stellt die tatsächliche Klasse dar. In der Darstellung fällt auf, dass sich lediglich die Klasse der Lagerbuchsen als Cluster vom Rest separiert. Weiter liegen teilweise einzelne geometrisch ähnliche Bauteile verschiedener Klassen nahe beisamen (z. B. Sub-Cluster Adapterplatte und Stoßdämpferkonsole). Insgesamt scheint dieser Ansatz jedoch bei wenig Realdaten flächiger Bauteile ungeeignet.

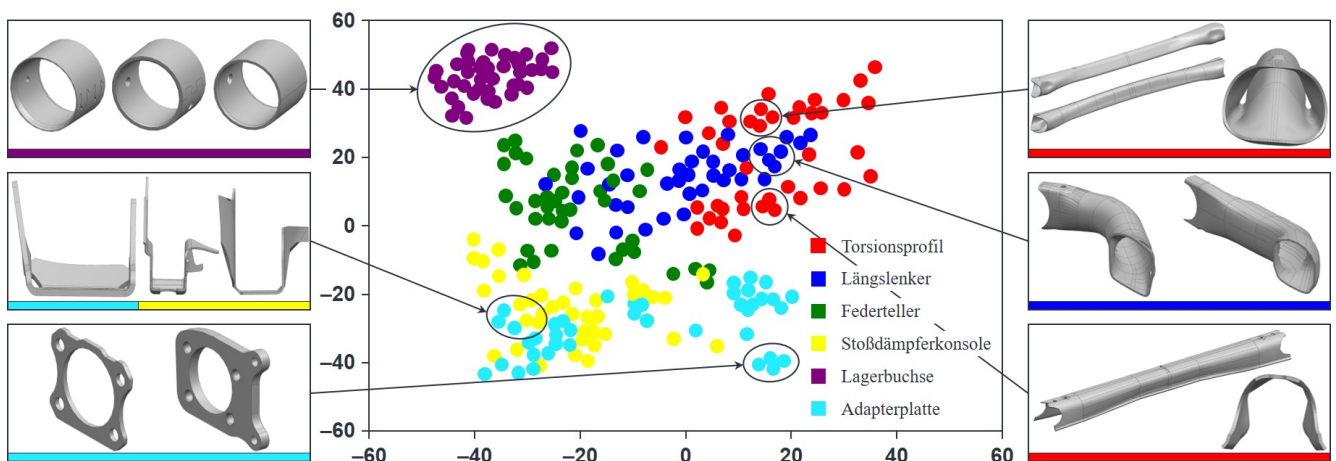


Abbildung 5.5: t-SNE Visualisierung von latenten Vektoren (eigene Darstellung).

5.1.4 Analyse lokaler Deskriptoren

Bei der in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen lokalen Ähnlichkeitsanalyse nach van Blokland & Theoharis (2021) werden basierend auf der Abfrage (engl. *query*) eines neuen Bauteils ähnliche Formen in einem vorliegenden Datensatz gesucht. Mit einem Datensatz aus 382 Fahrzeugblechteilen aus 9 Klassen wird zunächst der sog. *dissimilarity tree* aufgebaut. Der Code und die zum Training gewählten Hyperparameter können Anhang A6.3 entnommen werden. Für die Bestimmung lokal ähnlicher Geometrien nach dem *nearest neighbor* Prinzip wird die Hamming Distanz gewählt. Bei jeder Abfrage des Baums wird eine Stimme (engl. *vote*) vergeben. Dieser Prozess wird bis zu einem definierten Abbruchkriterium wiederholt. Die ähnlichste Form gehört zu dem QUICCI-Deskriptor mit den meisten Votes. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

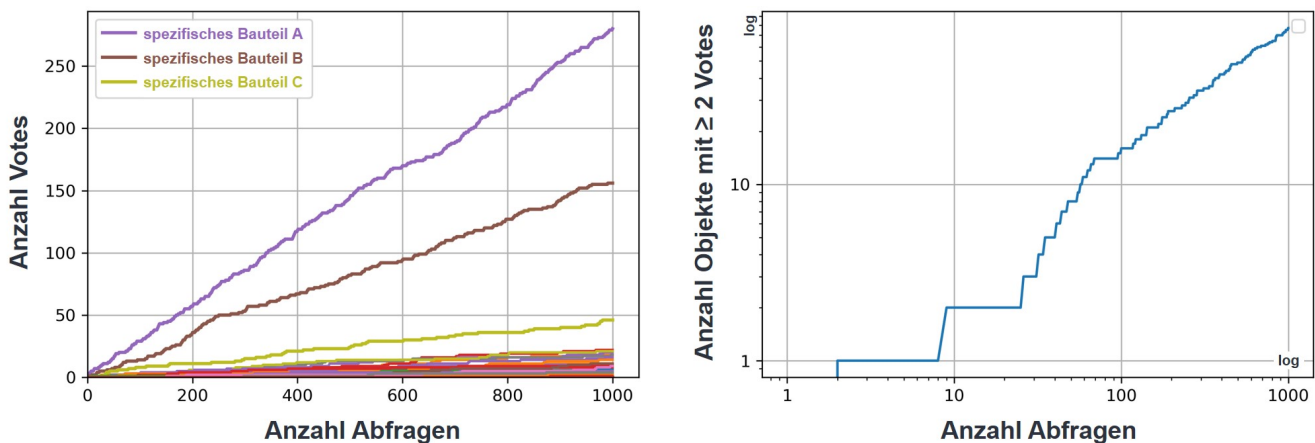


Abbildung 5.6: Anzahl der Votes des *disassembly tree* in Abhängigkeit der Anfragen (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Ortiz Lizarraga 2024).

Der Verlauf der Votes über die Anzahl der Anfragen (Abbildung 5.6 links) zeigt, dass im Allgemeinen ähnliche Objekte gefunden werden. Da im Vergleich zur Bauteilklassifikation keine *ground truth* existiert, ist eine **quantitative** Bewertung der Modellgüte, d. h. inwiefern die Formen tatsächlich ähnlich sind, nur eingeschränkt möglich. Die quantitative Analyse des Modells fokussiert daher die Optimierung der Hyperparameter Radius, Deskriptorgröße sowie Bogen- und Winkeltoleranz. Dabei wird die Performanz des Modells danach bewertet, wie gut das Modell die Gesamtgeometrie eines Bauteils basierend auf einem Teil dessen Geometrie erfasst. Das Verhältnis zwischen der Anzahl korrekter Votes (d. h. korrekt zugeordneter Bauteile) und der Anzahl der Anfragen wird als *precision* bezeichnet. Die Auswertung erfolgt anhand der drei Kategorien Kanten, Abstufungen und Flächen. Je nach gewählter Hyperparameter werden diese unterschiedlich gut erkannt. Der Einfluss der Hyperparameter auf diese Analyse wird in Anhang A6.3 zusammengefasst. Insgesamt erreicht der Ansatz eine *precision* von bis zu 100 % (siehe Anhang A6.3).

Ergänzend erfolgt die Evaluation des Ansatzes **qualitativ** durch die Einschätzung eines Experten. Dieser vergleicht die Geometrie des angefragten Bauteils mit solchen Bauteilen, die bei einer Grenze von 100 Anfragen zwei und mehr Votes erhalten (Abbildung 5.6 rechts). Hierzu werden 70 neue Blechteile eingeführt. Fünf davon werden per Zufall als Anfrage ausgewählt. Die restlichen 65 werden zu dem bestehenden Datensatz hinzugefügt. (vgl. A_Ortiz Lizarraga 2024) Das Ergebnis der lokalen Ähnlichkeitssuche ist anhand einer exemplarischen Bauteilabfrage in Abbildung 5.7 dargestellt. Neben dem symmetrischen Gegenstück (rechte und linke Fahrzeugseite) findet der Ansatz nach Meinung der Experten Objekte mit lokal ähnlicher, geometrischer Form.



Abbildung 5.7: Qualitative Evaluation ähnlicher Objekte (eigene Darstellung nach A_Ortiz Lizarraga 2024).

Im Kontext einer neuen Kundenanfrage erlauben die vorgestellten Ansätze als Ergebnis von Schritt 1 die Ermittlung ähnlicher, bereits produzierter Produktvarianten. Weiter werden vorliegende Bauteilvarianten und Features identifiziert. Um nun im zweiten Schritt den variantenspezifischen Vorranggraphen abzuleiten, werden diese Produktcharakteristika im folgenden Kapitel 5.2 mit den notwendigen Prozessschritten in Zusammenhang gebracht.

5.2 Systemmodellierung zur Ableitung des Prozessvorranggraphen

Ziel dieses zweiten Schritts ist die Identifikation und Charakterisierung der zur Herstellung der angefragten Verbundlenkerachse notwendigen Prozessschritte sowie deren Abfolgerestriktionen. Dieser Schritt wird in der industriellen Praxis beim Zulieferer bis dato manuell durchgeführt. Neben allgemein bekannten Zusammenhängen wie bspw. zwischen Produktfeature (z. B. Loch) und Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (z. B. Bohren) erfordert diese Aufgabe viel Erfahrungswissen. Das motiviert die Formalisierung solcher Planungsregeln als Wechselwirkungen bei der Modellierung des PPR-Systems gemäß dem in Kapitel 4.2 beschriebenen Vorgehen. Hierbei fokussiert Abschnitt 5.2.1 die ersten drei Phasen (Produkt-, Prozess-, Produktionssystemmodell) aus Abbildung 4.15 und Abschnitt 5.2.2 darauf aufbauend die verbleibenden beiden Phasen (Wechselwirkungen und Nutzung). Abschnitt 5.2.3 wirkt ergänzend und fasst die Ergebnisse der datengetriebenen Modellierung zusammen.

5.2.1 Modellierung des PPR-Systems

Die Grundlage für die gesamte Systemmodellierung im Anwendungsfall bilden die im eigenen Ansatz vorgestellte Ontologie für Produkt-Produktions-Systeme nach Schäfer & Günther et al. (2023) sowie die in Kapitel 4.2 allgemein in Cameo als SysML-Profile eingeführten Klassen, Attribute und deren Beziehungen.

Das instanziierte **Produktmodell** des Verbundlenker-Baukastens besteht aus einer hierarchischen Struktur der Systemelemente und deren Attribute. Dabei umfasst der Baukasten alle jemals produzierten RTB- und Bauteilvarianten und deren zugehörigen Features. Neben den Hauptkomponenten aus Abbildung 5.1 werden optionale Bauteile wie bspw. obere und untere Verstärkungsbleche, Schweißmutter und Halterungen integriert. Die Struktur des Produktmodells wird maßgeblich durch die Modellierung der Schweißnähte (i. A. der Bauteilverbindungen) beeinflusst. Der Baukasten fasst hier alle möglichen Kombinationen zusammen. Eine Übersicht, welche Features in Zusammenhang mit welchen Bauteilvarianten stehen, kann Tabelle A7.1 entnommen werden. Die SysML-Implementierung dieser Zusammenhänge ist analog in Tabelle A7.2 dargestellt. Da die grafische Visualisierung des gesamten Produktbaukastens mit ausreichender Bildauflösung nicht möglich ist, zeigt Abbildung 5.8 einen Ausschnitt beispielhafter Modellinhalte.

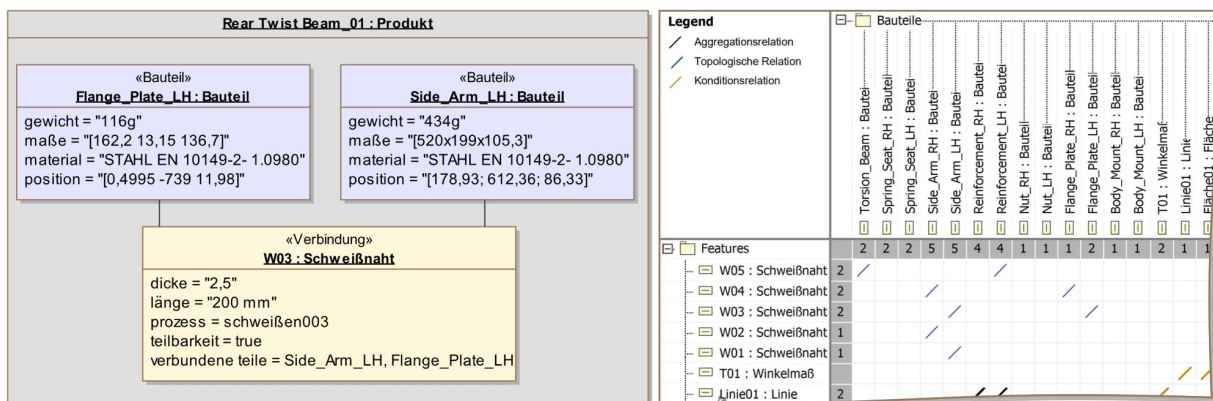


Abbildung 5.8: Links: Exemplarische Bauteil-Instanzen inkl. Attribute. Rechts: Exemplarische Beziehungen zwischen Bauteilen und Features. (eigene Darstellung)

Das **Prozessmodell** beinhaltet wie in Abschnitt 4.2.2 eingeführt die betriebsmittelunabhängige Beschreibung der Prozesse. Eine Instanziierung erfolgt indem die konkreten, zur Herstellung des RTB notwendigen Prozesse modelliert werden. Dabei können die als Referenz vorliegenden Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (2003) bei Bedarf um anwendungsfallspezifische Verfahren oder notwendige Attribute ergänzt werden. Die beim Zulieferer fokussierten Produktionslinien umfassen primär Füge-, Trenn- und Prüfprozesse. Der Fokus der Planung und damit der Modellierung liegt auf den Schweißprozessen. Eine Verknüpfung der Prozessinstanzen mit den Produktfeatures erfolgt im nachfolgenden Abschnitt 5.2.2.

Das **Produktionssystemmodell** beschreibt alle Ressourcen des betrachteten Produktionssystems sowie deren Attribute und Beziehungen. Im Anwendungsbeispiel liegen primär Schweiß-, Laserschneid- und Prüfstationen vor. Die angrenzenden Gewerke der Teilefertigung (Presserei) und Lackiererei werden ebenfalls modelliert. Da jedoch die wiederkehrende, variantenspezifische Planung die Optimierung der hochautomatisierten Linie fokussiert, beschränkt sich die folgende Beschreibung auf die betrachteten Stationen dieser variantenspezifischen Linien. Für einen einheitlichen Aufbau der Stationen wird ein modularer Anlagenbaukasten (siehe Tabelle 5.2) eingeführt. Zentral für den vorliegenden Anwendungsfall beim Zulieferer ist die Unterscheidung zwischen *Turntable Cell* (TC) und *Orbit Cell* (OC). Erstere verfügt über einen Drehtisch, der durch die Drehung um seine z-Achse eine Parallelisierung von Handhabungsprozessen (Be- und Entladen) auf der Vorderseite sowie wertschöpfenden Prozessen (z. B. Schweißen) auf der Rückseite ermöglicht. Es ist anzumerken, dass die dargestellten Merkmale teilweise nicht unabhängig voneinander sind. So erfordert ein Drehtisch z. B. immer zwei Spannvorrichtungen, eine Station vom Typ OC hingegen nur eine. Diese Regeln zur Kombination der Ressourcen werden über Constraints und Kardinalitäten modelliert. Die aus zulässigen Kombinationen des Baukastens resultierenden Stationen definieren zudem den Lösungsraum der Optimierung in Kapitel 5.3 sowie die Elemente der Simulation in Kapitel 5.4. Ein Ausschnitt eines exemplarischen, instanziierten Produktionssystemmodells ist in Abbildung A7.1 dargestellt.

Tabelle 5.2: Modularer Aufbau der Stationen in der RTB-Herstellung.

Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen
Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen	Merkmalsausprägungen
Peripherie	kein Drehtisch (OC)	Drehtisch (TC)
Spannvorrichtung	1 Vorrichtung	2 Vorrichtungen
Anzahl Roboter	1 Roboter	2 Roboter
Beladung	Roboter	Mitarbeiter
Entladung/Transfer	Roboter	Mitarbeiter

5.2.2 Modellierung der Wechselwirkungen und Ableitung des Prozessvorranggraphen

Die Modellierung von **Wechselwirkungen** als Beziehungen zwischen Elementen und Attributen des Produkt-, Prozess- und Produktionssystemmodells ist für die assistierte Produktionsplanung von zentraler Bedeutung (Schäfer & Günther et al. 2023). Zur SysML-Implementierung von Wechselwirkungen zwischen Elementen werden vorrangig **Allokationsbeziehungen** verwendet. Abbildung 5.9 (analog Abbildung A7.2 in groß) zeigt sowohl die Verknüpfung von Elementen des Produktmodells und deren zugehörigen Prozessschritten als auch die Zuordnung von Ressourcen zu deren ausführbaren Prozessen. Letzteres erfolgt über die Prozessfähigkeit der Ressource nach Eigner & Koch et al. (2017).

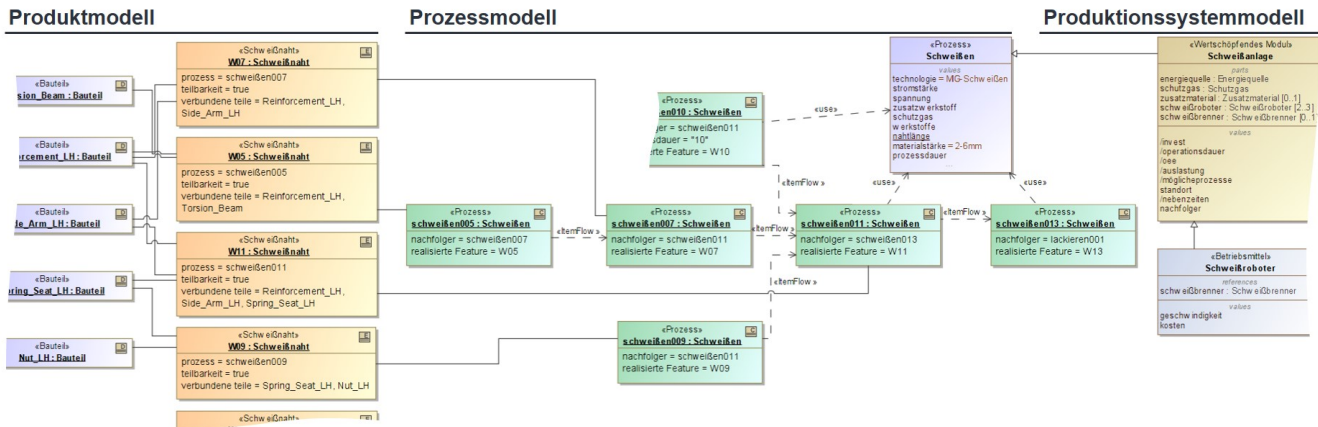


Abbildung 5.9: Exemplarische Wechselwirkungen zwischen Produkt-, Prozess- und Produktionssystemmodell (eigene Darstellung).

Neben der in Normen wie bspw. der ISO 10303 (2006) enthaltenen Zuordnung von Features (im dargestellten Ausschnitt Schweißnähte) zu deren zugehörigen Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (2003) werden im PPR-Modell zur Planung beim Zulieferer weitere anwendungsfall-spezifische Produkt-Prozess-Zusammenhänge implementiert. Ein konkretes Beispiel ist die Notwendigkeit des Prozessschritts «Dichtigkeitsprüfung» nur für den Fall der Bauteilvariante «geschlossener Querträger» und nie bei offenen Querträgern. Die im Produktbaukasten abgebildete Vielfalt von Bauteilvarianten und teilweise optionalen bzw. alternativen Features (vgl. Tabelle A7.1) sorgt gleichzeitig für eine Vielzahl verschiedener (ebenfalls teilweise optionaler/alternativer) Prozessschritte. Die Gesamtheit aller für die betrachtete Herstellung einer Verbundlenkerachse theoretisch möglichen und nötigen Prozessschritte und deren Abfolge-restriktionen werden in dem **Maximalvorranggraphen** zusammengefasst. Das zugehörige SysML-Diagramm lässt sich auf gegebenem Platz visuell nicht lesbar darstellen, weshalb in Abbildung A7.3 die Darstellung als Vorrangmatrix gewählt wird. Die enthaltenen Vorrangbeziehungen sind als harte Restriktionen zu verstehen. So *muss* im Falle eines zweiteiligen Längslenkers dieser erst verschweißt werden, bevor er an den Querträger geschweißt werden kann. Die Tatsache, dass aus Erfahrung toleranzkritische Schweißnähte erst später in der Linie erzeugt werden *sollen*, stellt keine Vorrangbeziehung dar, sondern ist Gegenstand der nachfolgenden Optimierung beim *Assembly Line Balancing* (ALB).

Durch die Allokation von Modellelementen lassen sich basierend auf der vorliegenden RTB-Variante die für die Optimierung notwendigen Prozesse und deren Vorrangbeziehungen identifizieren. Um jedoch relevante Prozessparameter (z. B. Prozessdauer) zu ermitteln, müssen die Attribute der Elemente über **Constraints** verbunden werden. Der Fokus bei der Modellierung solcher Wechselwirkungen liegt besonders auf planzeitbezogenen Attributen. Abbildung 5.10 und Abbildung A7.4 zeigen auszugsweise anhand von SysML Constraint-diagrammen, wie sich die Taktzeit einer Produktionslinie als maximale Zykluszeit über alle Stationen ergibt.

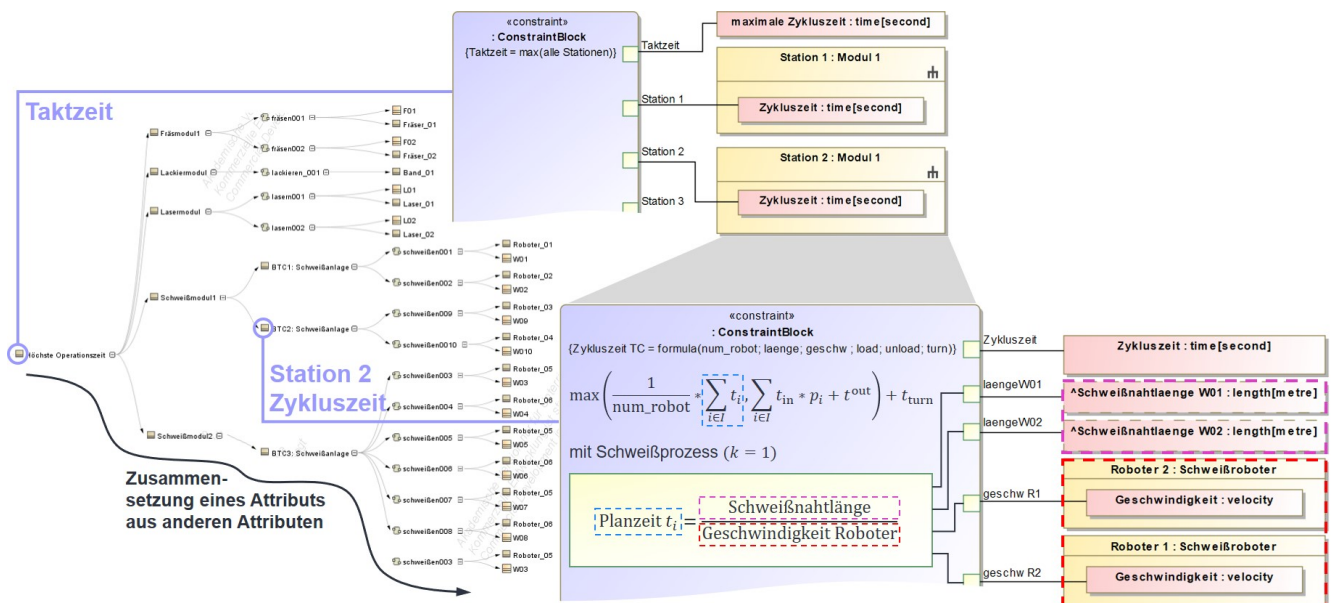


Abbildung 5.10: Modellierung zeitbezogener Constraints (eigene Darstellung).

Weiter ist dargestellt, wie sich diese Zykluszeiten der einzelnen Stationen dynamisch in Abhängigkeit des gewählten Stationsequipments (z. B. 1 oder 2 Roboter, TC oder OC etc.) und der Attribute der allokierten Produktfeatures berechnen. Aus diesen Constraints lassen sich die Planzeiten der Prozessschritte des oben erwähnten Vorranggraphen bestimmen. Als Beispiel ergibt sich die Planzeit beim «Schweißen» vereinfacht als Prozessdauer in Abhängigkeit der Länge einer «Schweißnaht» und der Geschwindigkeit des «Roboters».

Verbleibendes Planungswissen, das nicht in Form der beschriebenen PPR-Wechselwirkungen formalisiert werden kann, wird zuletzt über SysML **Requirements** abgebildet. Konkrete Beispiele können Abbildung A7.5 im Anhang entnommen werden. Solche Requirements erlauben die Eingabe von Planungsregeln als Freitext (z. B. „360° Schweißnähte können nicht am Stück geschweißt werden“), die dann wiederum bestimmten Modellelementen zugeordnet und damit nutzbar gemacht werden (Martin & Schäfer et al. 2024).

Die **Nutzung** des PPR-Modells im Anwendungsbeispiel verwendet die im ersten Schritt (Kapitel 5.1) identifizierten Bauteilvarianten und Features, um anhand der modellierten Wechselwirkungen die zur Herstellung des angefragten RTB notwendigen Produktionsprozesse sowie deren Abfolgerestriktionen und Eigenschaften zu identifizieren. Der variantenspezifische Vorranggraph ergibt sich aus dem für die Variante relevanten Teil des in Abbildung A7.3 modellierten Maximalvorranggraphen. Dieser Teil kann als csv-Tabelle exportiert werden und stellt den Input für die mathematische Optimierung im dritten Schritt (Kapitel 5.3) dar. Da die oben beschriebene manuelle Externalisierung und Formalisierung von Planungsregeln im Bereich der Prozesszeiten besonders aufwändig ist, wird im Folgenden genauer auf die datengetriebene Ermittlung von Planzeiten eingegangen.

5.2.3 Datengetriebene Modellierung der Wechselwirkungen

Im Bezug auf das im eigenen Ansatz präsentierte Vorgehen (vgl. Abbildung 4.23) liegt der Fokus dieser Anwendung auf der neu eingeführten Phase Model Selection sowie den Phasen Modeling und Evaluation. Es werden ausgewählte Lösungsansätze exemplarisch vorgestellt und verglichen. Hierzu werden zunächst die vorliegenden Arbeitsschritte in die entwickelte Auswahlmatrix eingeordnet. Da die getaktete Linienproduktion meist eine relativ geringe Variabilität des Arbeitsablaufs besitzt, werden hier auch unterstützende Arbeitsschritte der Blechverarbeitung betrachtet. Abbildung 5.11 fasst die Charakterisierung von insgesamt zehn Prozessen zusammen. Im Folgenden wird auf jeweils ein (rot markiertes) Beispiel der Verfahrensklassen A, C und D genauer eingegangen. Die zeitlichen Zusammenhänge beim automatisierten Schweißen (6) als Beispiel der Klasse B werden bereits im vorausgehenden Abschnitt 5.2.2 ausführlich betrachtet (siehe Abbildung 4.21). Tabelle 5.3 gibt schließlich einen Überblick über alle zehn Anwendungen.

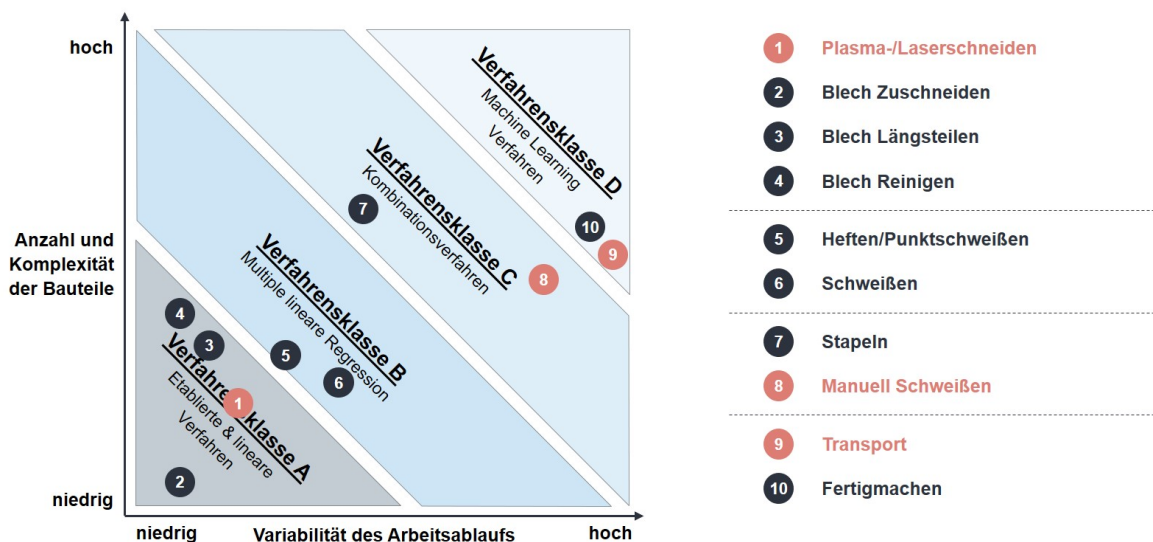


Abbildung 5.11: Charakterisierung der Arbeitsabläufe (eigene Darstellung).

Als Beispiel für die **Verfahrensklasse A** wird eine MTM-Analyse des Plasma-/Laserschneidens durchgeführt. Dabei wird die Tätigkeit in einzelne, standardisierte Zeitbausteine zerlegt. Für n Blechteile ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$t_{ges} = t_{Rüsten} + n * MTM_{Faktor} * Brennlänge + (n - 1) * t_{Umsetzen} + n * t_{Handhabung}$$

Für Rüst- ($t_{Rüsten}$), Umsetz- ($t_{Umsetzen}$) und Handhabungszeiten ($t_{Handhabung}$) existieren (gewichtabhängig) definierte Fixzeiten. Die wertschöpfende Brennzeit ist abhängig von der Blechdicke und dem Material (siehe Abbildung 5.12). Hierfür wird für jede vorliegende Kombination eine einzelne Auswertung erstellt und so ein Zuschlagsfaktor MTM_{Faktor} angenähert. Die dafür notwendige Erhebung der Zeitdaten ist besonders aufwändig und daher bei komplexeren Arbeitsfolgen nicht zu empfehlen.

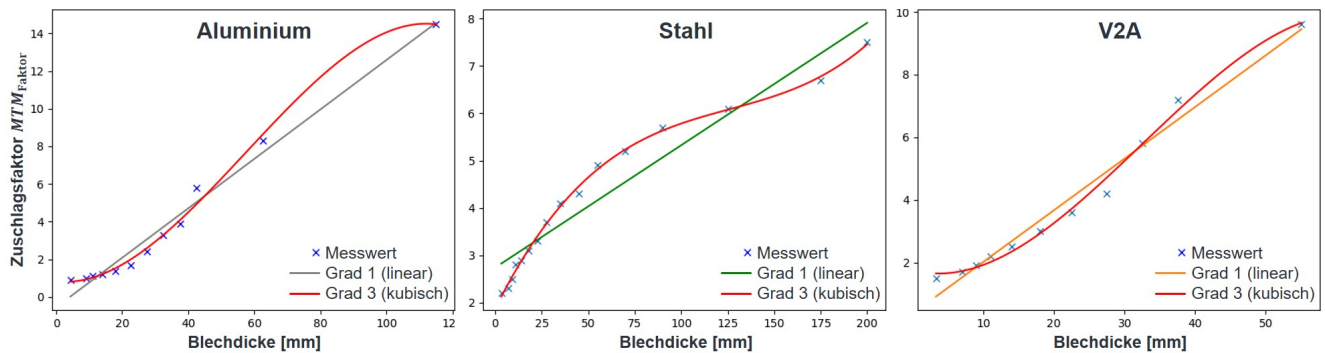
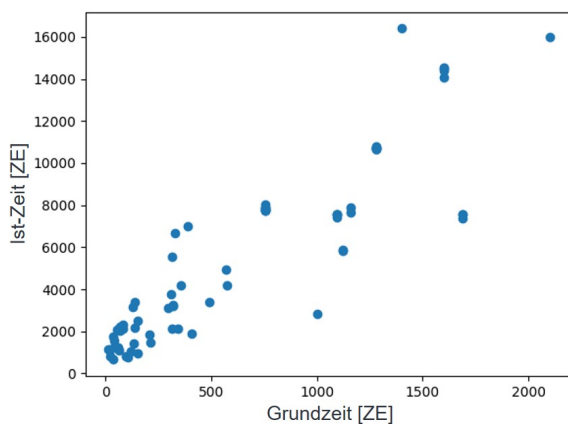


Abbildung 5.12: Angenäherte Zugschlagsfaktoren in Abhängigkeit der Blechdicke und Materialsorte (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Gese 2024).

Das manuelle (Nach-) Schweißen besteht aus drei wesentlichen Zeitanteilen: einer wertschöpfenden Grundzeit für das Schweißen, einem von der Anzahl der Bauteile abhängigen Zeitanteil für bspw. das Einlegen oder Ausrichten sowie einem unplanbaren, stochastischen Zeitanteil. Letzterer ist von den Prüfergebnissen und der Erfahrung des durchführenden Mitarbeiters abhängig. Hier eignen sich Kombinationsverfahren der **Verfahrensklasse C**. Der Grundzeitanteil kann, wie in Abbildung 5.13 dargestellt, bestimmt werden und korreliert mit der gemessenen Gesamtzeit.



1 Bestimmung der Schweißnahtlänge

2 Bestimmung des Schweißnahtvolumens

3 Bestimmung des Schweißnahtgewichts

4 Berechnung der Grundzeit
(als Schweißzeit aus Abschmelzleistung mit MiG 3,5kg/h)

Ergebnis entspricht unterer Grenze der Schweißzeit

Abbildung 5.13: Korrelation zwischen berechneter Grundzeit und Ist-Zeit (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Gese 2024).

Für den bauteilabhängigen und stochastischen Zeitanteil wird eine multiple lineare Regression durchgeführt. Bei einer hohen Anzahl von Einflussgrößen berechnet das sog. *Permutation Feature Importance* Verfahren einen Faktor je Einflussgröße, der deren Relevanz ausdrückt. Die Größen mit dem höchsten Einfluss auf die Gesamtzeit werden schließlich in die Regressionsformel aufgenommen. Mit Integration der Grundzeit ergibt sich im betrachteten Beispiel folgender Zusammenhang, der mit nur fünf Einflussgrößen (n_{1-4} = jeweils Anzahl verschweißter Teile verschiedenen Typs₁₋₄) auf ein $R^2 = 0,9416$ kommt.

$$t_{ges} = 252 * n_1 + 137 * n_2 + 135 * n_3 - 460 * n_4 + 3,31 * t_{Grund} + 101$$

Im Bereich der **Verfahrensklasse D** für sehr variable Arbeitsvorgänge eignen sich Verfahren des Maschinellen Lernens. Am Beispiel des Transports wird das mit einem Entscheidungsbaum evaluiert. Ein sog. *GridSearchCV* Algorithmus reduziert die Vielzahl von Einflussparametern zunächst auf die bestmögliche Kombination. Mit sechs verbleibenden Einflussgrößen erreicht der Entscheidungsbaum jedoch nur ein R^2 von 0,8458. Die niedrige Modellgüte lässt sich neben der geringen Stichprobe ($Anz = 59$) auf die Vielzahl relevanter Einflussgrößen zurückführen. Relevante Größen aus dem vorliegenden Datensatz sind dabei die aktuelle Kapazitätsauslastung und die Verfügbarkeit des Transportmittels. Beides sind jedoch Größen, die in der Planung unbekannt und damit nicht nutzbar sind.

Tabelle 5.3: Ergebnisse der datengetriebenen Modellierung in Anlehnung an A_Gese (2024).

Nr.	Prozess	Verfahren	R^2	RMSE	MAPE	Daten- grundlage
1	Plasma-/Laserschneiden	MTM/REFA	n/a	n/a	n/a	$\emptyset = 20$ $Anz = n/a$
2	Blech Zuschneiden	einfache Planzeitformel	n/a	n/a	n/a	$\emptyset = 109$ $Anz = n/a$
3	Blech Längsteilen	einfache Planzeitformel	n/a	n/a	n/a	$\emptyset = 86$ $Anz = n/a$
4	Blech Reinigen	einfache Planzeitformel	n/a	n/a	n/a	$\emptyset = 197$ $Anz = n/a$
5	Heften / Punktschweißen	Planzeitklassen	0,9840	13ZE	5,7 %	$\emptyset = 45$ $Anz = 89$
6	Schweißen	Multiple lineare Regression	0,9245	12ZE	14,1 %	$\emptyset = 128$ $Anz = 89$
7	Stapeln	Multiple lineare Regression	0,9723	464ZE	8 %	$\emptyset = 4105$ $Anz = 30$
8	Manuell Schweißen	Kombinationsverfahren	0,9416	1014ZE	12,1 %	$\emptyset = 5580$ $Anz = 72$
9	Transport	Decision Tree Regression	0,8458	183ZE	12,8 %	$\emptyset = 895$ $Anz = 59$
10	Fertigmachen	Kombinationsverfahren	0,9207	118ZE	17 %	$\emptyset = 547$ $Anz = 77$

ZE: Zeiteinheiten; \emptyset : Durchschnitt; Anz : Anzahl Beobachtungen

Zusammenhänge aus Tabelle 5.3 mit ausreichend hoher Modellgüte können mit Experten diskutiert und anschließend als Wechselwirkungen in das PPR-Modell integriert werden. So können bereits in der frühen Phase der Grobplanung die Planzeiten der Prozessschritte robuster prognostiziert werden. Die damit ermittelten Prozesszeiten bilden die Grundlage für die nachfolgende Optimierung der Zuordnung von Prozessschritten zu Stationen in Schritt 3 der assistierten Produktionssystemplanung.

5.3 Optimierung des Produktionssystems

In diesem Kapitel wird das im eigenen Ansatz entwickelte *Assembly Line Balancing Problem* (ALBP) für den konkreten Anwendungsfall der getakteten Herstellung von Verbundlenkerachsen beim Zulieferer initialisiert (5.3.1) und implementiert (5.3.2). Hierfür wird eine spezifische RTB-Kundenvariante und deren im zweiten Schritt abgeleiteter Prozessvorranggraph inkl. aller Produkt- und Prozesscharakteristika (z. B. Bauteilgewicht und Prozessdauer) herangezogen. Anschließend folgt die Evaluation der algorithmisch generierten Ergebnisse (5.3.3).

5.3.1 Initialisierung des Assembly Line Balancing Modells

Eine Charakterisierung des vorliegenden, realen Optimierungsproblems anhand von (nicht) getroffenen Annahmen und Vereinfachungen kann Tabelle 4.4 entnommen werden. Im Allgemeinen liegt im Anwendungsbeispiel ein ALBP vom Typ I nach Boysen & Fliedner et al. (2007) (siehe Abbildung 2.7) vor: Die Linie besitzt eine feste, stationsübergreifende **Taktzeit**. Diese ergibt sich durch die vom Kunden geforderte, jährliche Ausbringungsmenge von 250.000 Stück und die zur Verfügung stehende Produktionszeit gemäß:

$$c_t \leq \frac{248 \frac{\text{Tage}}{\text{Jahr}} \cdot 3 \frac{\text{Schichten}}{\text{Tag}} \cdot 7,5 \frac{\text{Stunden}}{\text{Schicht}} \cdot 3.600 \frac{\text{Sekunden}}{\text{Stunde}}}{250.000 \frac{\text{Stück}}{\text{Jahr}}} = 80,352s \approx 80s$$

Mit gegebener, maximaler Taktzeit verbleibt die Optimierung der Linienkonfiguration hinsichtlich vorgegebener **Zielkriterien**. Im betrachteten Beispiel liegt mit der Minimierung der Kosten und der Maximierung von Flexibilität, Qualität und Ergonomie ein multikriterielles Optimierungsproblem vor. Die Ergonomie wird als Randbedingung eingeführt. Die Flexibilität wird als Minimierung des Flächenbedarfs der Linie (Variantenflexibilität) und Maximierung der Taktzeitreserve (Mengenflexibilität) quantifiziert. Als Qualitätsindikator wird die Maßhaltigkeit betrachtet. Die teilweise konkurrierenden Ziele werden über die Methode der Skalarisierung kombiniert (vgl. Abschnitt 4.3.3.7). Im betrachteten Anwendungsfall liegt nach Meinung der Experten eine starke Priorisierung der Kostenminimierung ($\gamma = Co$) vor, wonach die Gewichtungsfaktoren für Kosten $\lambda_c = 0,6$; Flächenbedarf $\lambda_a = 0,15$; Taktzeitreserve $\lambda_f = 0,15$ und Toleranzabweichungen $\lambda_d = 0,1$ eingeführt werden.

Die variantenspezifische Linie umfasst mit dem Schweißen, Laserschneiden und Prüfen der Verbundlenkerachsen drei verschiedene Aufgabentypen. Dabei werden Schweißaufgaben ($k = 1$) dadurch charakterisiert, dass sie nicht-diskret auf mehrere Stationen aufgeteilt werden können. Weiter müssen alle Aufgaben über die in Abschnitt 5.2.2 beschriebene Prozessfähigkeit zur Ausführung einem spezifischen **Stationstyp** k zugeordnet werden ($\alpha_5 = type$). Neben der reinen Typenwahl ist die Auswahl des **Stationsequipment** zu treffen ($\beta_4 = res^\circ$). Im vorliegenden Beispiel einer komplexen *multi-manned* Produktionslinie können je Station bis zu zwei Roboter ($\beta_3 = pwork^2$) parallel arbeiten. Die Entscheidung zwischen TC (mit

Drehtisch) und OC (ohne Drehtisch) beeinflusst sowohl Kosten und Flächenbedarf als auch das Verhalten der Station, indem der Drehtisch eine zur Bearbeitung simultane Be- und Entladung der Station ermöglicht. Diese unproduktiven Zeiten werden explizit mitberücksichtigt ($\beta_5 = \Delta t_{unp}$). Dabei werden für die Handhabungsoperationen grundsätzlich Menschen eingesetzt. Bis zu einem Bauteil- bzw. Baugruppengewicht von 10 kg sind Roboter optional, ab dem Gewicht von 10 kg sind Roboter zwingend einzusetzen. Neben einem Kostenunterschied liegt hierbei zudem ein Unterschied in der Handhabungszeit vor. Die resultierenden, equipment-abhängigen Kosten (Tabelle A8.1), Zeiten (Tabelle A8.2) und Flächenbedarfe (Tabelle A8.3) können Anhang A8.1 entnommen werden. Tabelle A8.4 enthält zudem eine Auflistung der in das ALB Modell als Parameter aufgenommenen Gesamtkosten. Diese ergeben sich zur Linearisierung des Modells aus den Investitionskosten und den Betriebs- bzw. Lohnkosten über einen Zeitraum von drei Jahren.

Neben den Parametern der Ein-Produkt-Linie wird zudem die betrachtete, kundenspezifische Verbundlenkerachse selbst initialisiert. Diese ist definiert durch ihre Bauteile und Features sowie die im zweiten Schritt (Kapitel 5.2) identifizierten Aufgaben und deren Abfolgerestriktionen. Die **teilebezogenen Daten** umfassen das Gewicht und die Beladezeit der Bauteile und sind in Tabelle A8.5 zusammengefasst. Letztere unterscheiden sich für Menschen und Roboter und sind abhängig von Größe, Gewicht und Form (Vereinzelung der Bauteile aus einer Kiste) der Bauteile. Die **aufgabenbezogenen Daten** sind analog in Tabelle A8.6 dargestellt. Neben den Zeiten je Aufgabe wird zudem eine Mindestbearbeitung von 15 % je Schweißnaht ($x_{ij2} \geq 0,15 \ \forall \ x_{ij2} > 0$) sowie eine Dauer von 3 Sekunden für das Schweißen einer Überlappung festgelegt. Als toleranzkritische Aufgaben werden solche mit Einfluss auf die Position der Verbundlenkerachse im Fahrzeug d. h. Schweißnaht s2 (Lagerbuchse) und s3 (Adapterplatte) jeweils rechts und links betrachtet. Der für die betrachtete Achse gültige **Prozessvorranggraph** ist in Abbildung A8.1 dargestellt. Er ergibt sich als csv-Export aus dem SysML Maximalvorranggraphen (vgl. Abschnitt 5.2.2) und wird als Matrix P_{mn} initialisiert.

5.3.2 Implementierung des Assembly Line Balancing Modells

Das in Abschnitt 4.3.2 vorgestellte ALB Modell wird für den im vorausgehenden Abschnitt 5.3.1 initialisierten Anwendungsfall implementiert, um die generierten Ergebnisse zu evaluieren. Aufgrund der in Tabelle 5.4 dargestellten, besonders hohen Komplexität des Problems von bis zu 1,5 Mio. Constraints wird dabei zunächst eine Voruntersuchung durchgeführt.

Tabelle 5.4: Komplexität des betrachteten Optimierungsproblems.

	Variablen		Constraints	
ALB Modell	13 Variablen-Typen	9.159 Var.	53 Constraint-Typen	57.499 Const.
Erweiterungsmodell	22 Variablen-Typen	722.003 Var.	84 Constraint-Typen	1.533.181 Const.

5.3.2.1 Heuristische Voruntersuchung mit genetischem Algorithmus

Ziel der Voruntersuchung ist die Entwicklung einer Ausgangslösung für die nachfolgende, exakte Optimierung basierend auf der Trivillösung $|J| = |I|$. Aufgrund der Problemkomplexität und dem umfassend vorliegenden Domänenwissen wird hierzu mit dem genetischen Algorithmus NSGA-II ein heuristischer Lösungsansatz gewählt. Die Implementierung des NSGA-II Algorithmus erfolgt mit der Python Bibliothek DEAP nach Fortin & Rainville et al. (2012) (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Hierzu wird über eine modulare Codestruktur neben dem eigentlichen Modell (Zielfunktionen und Nebenbedingungen) und dessen Initialisierung im Anwendungsfall ein Algorithmus zum allgemeinen Aufbau eines Individuums entwickelt und implementiert. Ziel des Algorithmus ist die **Generierung von gültigen Individuen** (inkl. der Anfangspopulation) d. h. solchen, die die Constraints des ALB Modells einhalten. Eine Kurzzusammenfassung des zugehörigen Pseudocodes wird im nachfolgenden Algorithmus dargestellt. Der gesamte Pseudocode kann Anhang A8.2.1 entnommen werden.

Algorithmus 1: Erzeugung eines Individuums nach Schäfer & Tse et al. (2024).

Result: Zulässiges Individuum

```

1 while ein Prozess noch nicht vollständig verarbeitet wurde do
2   Bestimme die Prozesse, die noch nicht abgeschlossen sind
3   Bestimme die Prozesse, die nicht durch den Vorranggraphen eingeschränkt sind
4   Bestimme die Prozesse, die noch nicht der aktuellen Station zugewiesen wurde
5   Wähle zufällig einen Anteil eines Prozesses aus, der diese Anforderungen erfüllt
6   if die aktuelle Station noch Zeitkapazität hat, um den ausgewählten Anteil zu verarbeiten
    und den richtigen Typ hat then
7     Weise den Anteil der Station zu und aktualisiere die Zeitkapazität
8   else
9     Versuche einen anderen Anteil eines anderen Prozesses der Station gemäß dem
    oberen Teil zuzuweisen
10    if die aktuelle Station immer noch keine Zeitkapazität hat, um den ausgewählten Anteil
    zu verarbeiten then
11      Öffne eine neue Station eines Typs, um unvollständige Prozesse zu bearbeiten

```

Zunächst wird eine zufällige Anfangspopulation erzeugt, deren Individuen anhand der Zielfunktionen bewertet werden. In jeder nachfolgenden Generation wird die Population zunächst durch **zehn implementierte Mutationen** verändert. Für den Fall, dass ein modifiziertes Individuum eine Constraint verletzt, wird es durch einen **Reparaturmechanismus** korrigiert. Anschließend erfolgt eine erneute Bewertung der resultierenden Individuen. Weiter werden die ursprüngliche Population und die modifizierte Population zu einer neuen Population kombiniert. Zuletzt werden die Selektionsoperationen von NSGA-II bzw. DEAP verwendet, um die Individuen der nächsten Generation auszuwählen. (Schäfer & Tse et al. 2024) Die jeweiligen Funktionen der zehn entwickelten Mutationen und die Reparaturmechanismen werden in Tabelle 5.5 zusammengefasst (zugehöriger Pseudocode siehe Anhang A8.2.1).

Tabelle 5.5: Funktionale Beschreibung der Mutationen und Reparaturmechanismen.

Algorithmus	Funktion
1. Mutation	Austauschen von Aufgaben des gleichen Typs zwischen ihren bereits zugewiesenen Stationen.
2. Mutation	Änderung der Anzahl Bearbeitungsroboter an einer zufälligen Station.
3. Mutation	Änderung der Anzahl/Art der Beladungspunkte an einer zufälligen Station.
4. Mutation	Änderung der Handhabungsoption einer zufälligen Station.
5. Mutation	Änderung des Equipments einer zufälligen Station (TC zu OC & vice versa).
6. & 7. Mutation	Änderung der Aufteilung einer zufälligen, bereits geteilten Aufgabe.
8. Mutation	Vereinigung zweier benachbarter Stationen vom gleichen Typ.
9. Mutation	Auflösung einer Station auf ihre beiden Nachbarn.
10. Mutation	Vereinigung zweier Stationen vom gleichen Typ, die durch eine beliebige Station voneinander getrennt sind.
1. Reparatur	Vereinigung von Stationen bei Überschreitung der zulässigen Fläche.
2. Reparatur	Zuweisung von Equipment zu einer Station, die den Kundentakt überschreitet.

5.3.2.2 Exakte Lösung mit proprietärem Default Solver

Für die exakte Lösung des betrachteten ALBP wird aus den in Jablonský (2015) evaluierten Performancegründen der proprietäre Solver Gurobi verwendet. Ein solcher Solver bedient sich je nach Problemformulierung und -instanz aus einer Vielzahl vorab implementierter Lösungsalgorithmen wie z. B. dem **Branch-&-Bound**-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.1.3.2). Bei der Implementierung mit Python wird das *Package* „albalancer“ inkl. eigener Schnittstelle für den Modellaufruf entwickelt. Die resultierende, modulare Codestruktur ist in Abbildung 5.14 als UML Klassendiagramm dargestellt.

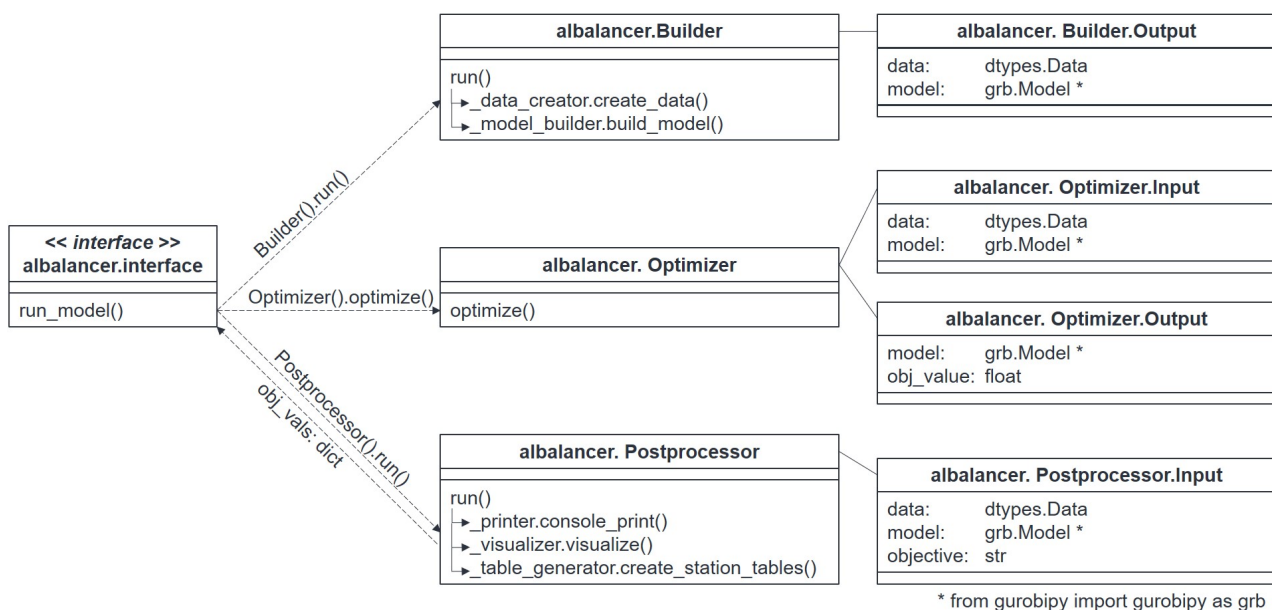


Abbildung 5.14: Struktur des *albalancer* Package inkl. Methodenaufrufe durch das Interface (eigene Darstellung nach Schäfer & Tse et al. 2025).

Die eigentliche Implementierung des ALBP über die Funktion `build_model()` folgt dem standardisierten Aufbau des Gurobi Modell-Objekts `grb.model` über die schrittweise Ergänzung von Variablen `grb.addVars()`, Constraints `grb.addConstr()` und Zielfunktionen `grb.setObjective()` (für beispielhafte Code-Ausschnitte siehe Anhang A8.2.2). An dieser Stelle soll nicht unerwähnt bleiben, dass zur besseren Lösbarkeit des Modells kleine Änderungen bei der Implementierung vorgenommen werden: Dazu zählt die Beachtung von numerischen Instabilitäten durch Gleitkommaoperationen, die automatische Korrektur bei schlechter Konditionierung des Problems durch die enthaltenen Big-M Terme sowie die Einführung von komplexitätsreduzierenden Constraints. Letzters sind Constraints, die sich aus der Kombination existierender Constraints ergeben und damit die zulässige Menge nicht verändern.

5.3.3 Evaluation und Interpretation der Ergebnisse

5.3.3.1 Ergebnisse der Voruntersuchung

Die heuristische Optimierung mittels genetischem Algorithmus fokussiert sich zunächst auf drei der vier in Abschnitt 4.3.2 formulierten Teilziele: Die Kostenminimierung G_c , die Minimierung des Flächenbedarfs G_a sowie die Minimierung von Toleranzabweichungen G_d . Abbildung 5.15 zeigt die Entwicklung der besten Fitness (je Generation) bei einkriterieller Minimierung der Zielfunktionen über den Verlauf von 100 Generationen.

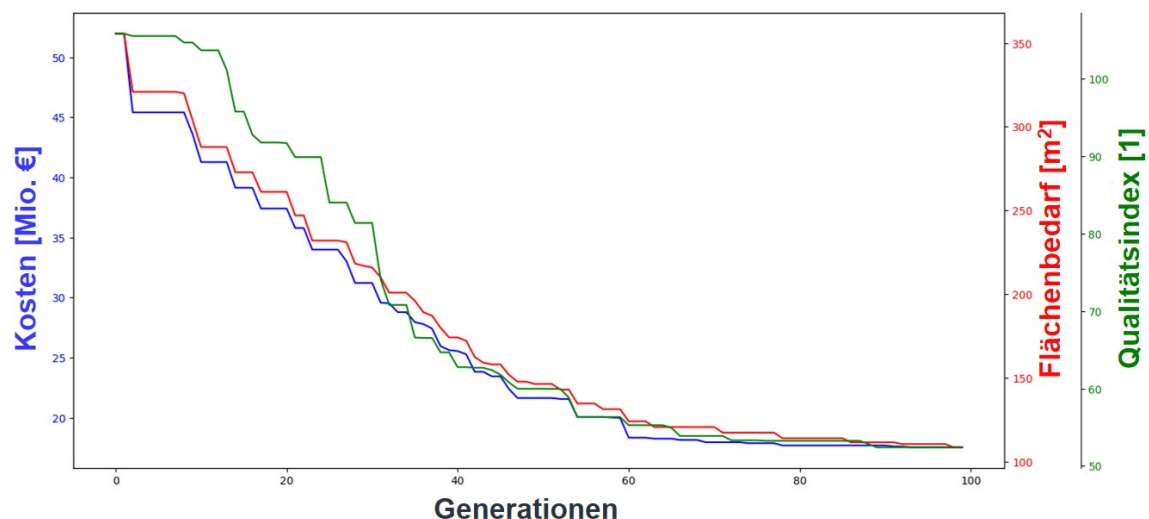


Abbildung 5.15: Konvergenz des genetischen Algorithmus (eigene Darstellung nach Schäfer & Tse et al. 2025).

In allen drei Fällen konvergiert die Kurve mit einer Sättigung nach ca. 60 Generationen. Im Verlauf der Generationen verbessert sich die beste Fitness von der ersten Population ($G_c = 53,135$ Mio. Euro, $G_a = 358,45 \text{ m}^2$ und $G_d = 120$) zur letzten Population um bis zu 69 % auf die Optimalwerte $G_c = 17,520$ Mio. Euro, $G_a = 110,87 \text{ m}^2$ und einen Qualitätsindex G_d von 48 (vgl. Toleranzabweichung, Formel (C4) in Kapitel 4.3.3.7).

Neben den besten Lösungen der einkriteriellen Optimierung ist in Abbildung 5.16 die Pareto-Front bei multikriterieller Zielerreichung dargestellt. Sie wird gebildet durch die besten Individuen der letzten Generation. Auf eine Diskussion der resultierenden Linienkonfiguration wird an dieser Stelle verzichtet und auf Schäfer & Tse et al. (2024) verwiesen. Weiter findet eine solche Diskussion im Detail mit den weitaus besseren Ergebnissen statt, die im Rahmen der exakten Optimierung gefunden werden.

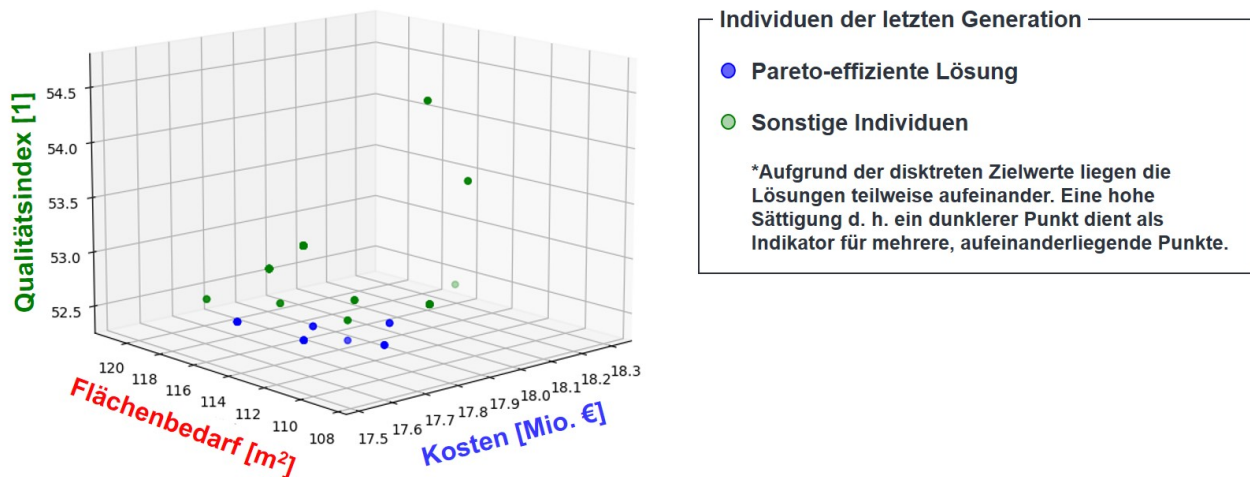


Abbildung 5.16: Ergebnisse der heuristischen Voruntersuchung mittels genetischem Algorithmus (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer & Tse et al. 2025).

Ein Risiko der heuristischen Optimierung liegt in dem Erreichen von lokalen statt globalen Minima (Nickel & Rebennack et al. 2022). Um die Lösung des Problems besser bewerten zu können, wird daher eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Das Ergebnis der jeweils einkriteriellen Minimierung ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass eine Erhöhung der Generationenzahl und Populationsgröße i. A. zu verbesserten Zielfunktionswerten (violett eingefärbt) führt. Ab einer bestimmten Größe flacht diese Verbesserung ab und der Algorithmus findet keine besseren Individuen mehr. Das motiviert die exakte Optimierung des in Kapitel 4.3.2 formulierten ALBP unter Verwendung dieser Ausgangslösung.

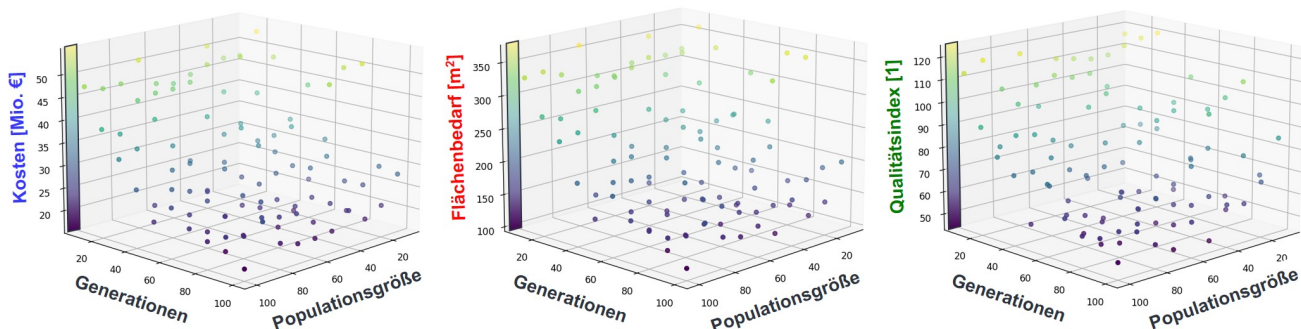


Abbildung 5.17: Sensitivitätsanalyse der einkriteriellen, heuristischen Voruntersuchung (eigene Darstellung nach Schäfer & Tse et al. 2025).

5.3.3.2 Ergebnisse der exakten Optimierung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der exakten, multikriteriellen Optimierung von Kosten (G_c), Qualität (G_d) und Flexibilität (Flächenbedarf G_a und Taktzeitreserve G_f) evaluiert. Um die Güte der multikriteriellen Lösung bewerten zu können, wird deren sog. Zielabweichung herangezogen. Hierfür sind zunächst die Optimalwerte durch einkriterielle Optimierung zu bestimmen. Tabelle 5.6 gibt eine Übersicht über die Eigenschaften der Lösungen. Es ist ersichtlich, dass außer bei der Optimierung der Taktzeitreserve jeweils die minimal mögliche Anzahl von 7 Stationen erreicht wird. Das Kostenoptimum liegt bei 11,19 Mio. Euro, wovon die einkriterielle Flächenminimierung mit 0,44 bzw. die multikriterielle Optimierung mit 0,27 Mio. Euro (2,39 %) nur unwesentlich entfernt sind. Ein ähnliches Bild ergibt sich bzgl. der Variantenflexibilität der Fabrik d. h. der Minimierung des Flächenbedarfs einer Linie: Hier ist die kostenoptimale Lösung zwar platzsparender als die multikriterielle Optimierung, beide haben jedoch weniger als 10 % Zielabweichung. Beim Qualitätsindex ist ersichtlich, dass die anderen einkriteriellen Versuche zwar weit vom Optimalwert entfernt liegen, die multikriterielle Optimierung jedoch 0 % Zielabweichung erreicht. Aufgrund des ungünstigen Gradienten der Mengenflexibilität ist die Zielabweichung aller Lösungen im Hinblick auf die Taktzeitreserve von 48 Sekunden wenig verwunderlich.

Tabelle 5.6: Übersicht über die Ergebnisse der exakten Optimierung in Anlehnung an Schäfer & Tse et al. (2025).

		Stationen [Stück]	Kosten [Mio. €]	Fläche [m ²]	Qualitätsindex [1]	Taktzeitreserve [s]	Laufzeit [s]
einkriteriell	Stationen	7	12,2862	87,91	17	0,00	23,46
	Kosten	7	11,1892	76,13	20	0,00	790,22
	Flächenbedarf	7	11,6314	73,75	18	0,00	593,00
	Qualität	7	13,0758	93,30	11	0,00	45,87
	Taktzeitreserve	20	40,6362	256,89	37	48,00	87,87
	Optimum	7	11,1892	73,75	11	48,00	-
multikriteriell	absolut	7	11,4566	80,52	11	2,37	387,24
	Zielabweichung	0 %	2,39 %	9,19 %	0 %	-95,06 %	-

Die dargestellten Lösungen unterscheiden sich neben ihrer resultierenden Zielerreichung auch hinsichtlich des ausgewählten Stationsequipments und deren Aufgabenzuteilung. Diese beiden Aspekte werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit über ein Gantt-Diagramm je eröffneter Station visualisiert. Ein beispielhaftes Diagramm einer Station mit Drehtisch zeigt Abbildung 5.18. Das Diagramm enthält die Belegung der Station. Bearbeitungs- und Handhabungsseite sind über die Zeit zum Drehen des Drehtischs synchronisiert. Die Balken der Bearbeitungszeiten von Prozessschritten enthalten die zusätzlich notwendige Positionierzeit des Roboters und bei Bedarf eine optionale Zeit zum Schweißen der Überlappung. Alle Gantt-Diagramme der nachfolgend im Detail diskutierten Ergebnisse können **Anhang A8.3** entnommen werden.

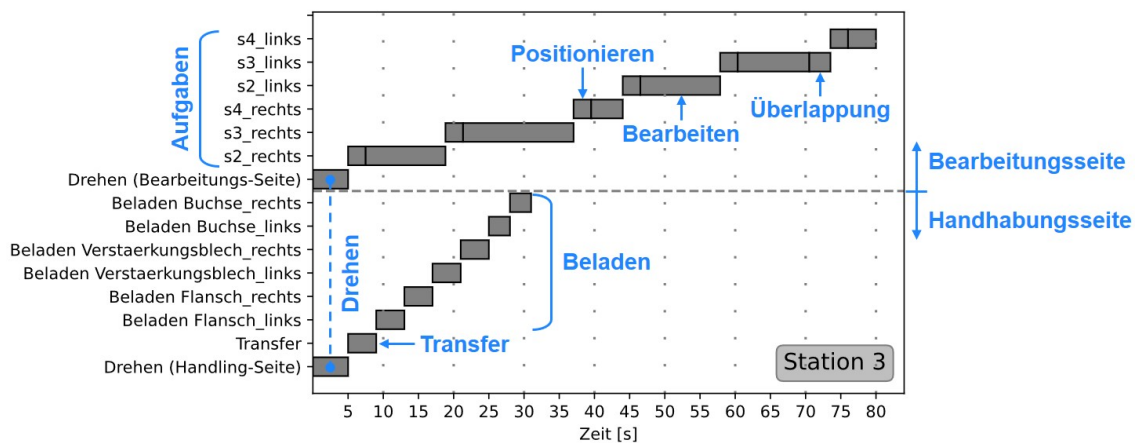


Abbildung 5.18: Darstellung der Aufgabenzuordnung als Gantt-Diagramm (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).

Bei **einkriterieller Kostenminimierung** ergibt sich das in Tabelle 5.7 zusammengefasste Stationsequipment. Dabei wird ausschließlich an einer von sieben Stationen eine TC bei insgesamt neun Robotern eingesetzt. Die Beladung der Einzelteile erfolgt durchweg manuell. Der Transfer hingegen ist aufgrund eines Gewichts von über 10 kg ab Station 3 durch die teurere Roboter-Option durchzuführen. Wie Abbildung A8.2 im Anhang zeigt, sind die Laserschneid- (Station 2) und Prüfstation (Station 7) relativ gering ausgelastet. Da auf diesen Stationen jedoch keine Aufgaben eines anderen Typs bearbeitet werden können, ist dies im betrachteten Beispiel unumgänglich und es lässt sich kein besseres Balancing finden. Alle anderen Stationen sind nahezu maximal ausgelastet. An der ersten Station werden die Längslenker (rechts und links) verschweißt. Das erscheint mit Blick auf den Prozessvorranggraphen besonders sinnvoll, da diese Aufgabe als *Befähiger* vieler weiterer Aufgaben dient. Weiter wirkt die Wahl der TC an der dritten Station nachvollziehbar, da hier besonders viele Teile beladen werden müssen und damit die unproduktive Zeit in Relation zur Bearbeitungszeit sehr hoch ist. Die gewählte Bearbeitungsreihenfolge führt jedoch dazu, dass nach der Station weiterhin vier unverbundene Subteile vorliegen. Das ist auf die Kostenminimierung zurückzuführen, da andernfalls der Querträger verschweißt und ein weiterer Roboter für den Transfer eingesetzt werden müsste. Die *End-Of-Line* (EOL) Prüfung bildet den vom Vorranggraphen geforderten Abschluss der Linie.

Tabelle 5.7: Linienkonfiguration bei einkriterieller Kostenminimierung nach Schäfer & Tse et al. (2025).

Station	Stations-Typ	OC / TC	n Roboter	max. Teilgewicht	Beladen	Gewicht Zwischenprodukt	Transfer
1	Schweißen	OC	1	2,62 kg	Mensch	6,93 kg	Mensch
2	Laserschneiden	OC	1	0,00 kg	-	6,93 kg	Mensch
3	Schweißen	TC	2	0,60 kg	Mensch	9,93 kg	Mensch
4	Schweißen	OC	2	7,93 kg	Mensch	17,86 kg	Roboter
5	Schweißen	OC	1	1,05 kg	Mensch	19,01 kg	Roboter
6	Schweißen	OC	2	1,05 kg	Mensch	20,06 kg	Roboter
7	EOL Prüfen	OC	0	0,00 kg	-	20,06 kg	Roboter

Die **einkriterielle Flächenminimierung** ist ähnlich zur Kostenminimierung eine komplexere, equipmentabhängige Form der reinen Minimierung der Anzahl an Stationen. Die ersten beiden Stationen werden dabei komplett identisch ausgeführt wie bei der vorgestellten Kostenoptimierung. Ab der dritten Station unterscheiden sich die beiden Lösungen, wie es Tabelle 5.8 zusammenfasst. Auffällig ist, dass ausschließlich die platzsparende Variante der OC bei insgesamt 10 Robotern eingesetzt wird. Die Bearbeitung erfolgt an allen Stationen verhältnismäßig symmetrisch und für zeitaufwändige Arbeiten werden zwei parallele Roboter an einer Station herangezogen. Im Vergleich zur Kostenminimierung zeigen die Gantt-Diagramme in Abbildung A8.3, dass der Algorithmus auf die nicht-diskrete Zuordnung von Aufgaben verzichtet.

Tabelle 5.8: Linienkonfiguration bei einkriterieller Flächenminimierung.

Station	Stations-Typ	OC / TC	n Roboter	max. Teilegewicht	Beladen	Gewicht Zwischenprodukt	Transfer
1	Schweißen	OC	1	2,62	Mensch	6,93	Mensch
2	Laserschneiden	OC	1	0,00	-	6,93	Mensch
3	Schweißen	OC	2	0,60	Mensch	8,93	Mensch
4	Schweißen	OC	2	7,93	Mensch	16,86	Roboter
5	Schweißen	OC	2	1,05	Mensch	18,51	Roboter
6	Schweißen	OC	2	1,05	Mensch	20,06	Roboter
7	EOL Prüfen	OC	0	0,00	-	20,06	Roboter

Da Kosten und Flächenbedarf bei der **einkriteriellen Qualitätsoptimierung** keine Rolle spielen, ist die Linie mit vier TC Stationen, 10 Bearbeitungsrobotern und ausschließlich Robotern zum Transfer der Zwischenprodukte ausgestattet (siehe Tabelle 5.9). Die Stationsbelegung der Gantt-Diagramme in Abbildung A8.4 zeigt wie zu erwarten, dass die toleranzkritischen Schweißnähte (s2 und s3 jeweils rechts und links) erst an der letztmöglichen Station 6 fertiggestellt werden. Weitere Besonderheiten der Linienkonfiguration, wie z. B. das Laserschneiden der Längslenker erst an Station 3 durchzuführen, sind nicht intuitiv. Sie zeigen jedoch die Vielfalt der möglichen Sequenzen, die der Prozessvorranggraph trotz Abfolgerestriktionen erlaubt. Ebenso verdeutlicht das die Zufälligkeit der Linienkonfiguration bei einkriterieller Optimierung, da der Einfluss anderer Zielkriterien auf die Lösung nicht berücksichtigt wird. Am Beispiel der Qualität ist die Toleranzabweichung minimal und damit die Zielerreichung maximal, sobald alle toleranzkritischen Aufgaben auf der letztmöglichen Station bearbeitet werden. Die Konfiguration (z. B. TC oder OC) der restlichen Linie spielt dabei keine Rolle und ist demnach beliebig.

Tabelle 5.9: Linienkonfiguration bei einkriterieller Qualitätsoptimierung.

Station	Stations-Typ	OC / TC	n Roboter	max. Teilegewicht	Beladen	Gewicht Zwischenprodukt	Transfer
1	Schweißen	TC	1	7,93	Mensch	14,96	Roboter
2	Schweißen	TC	2	0,40	Roboter	15,76	Roboter
3	Laserschneiden	OC	1	0,00	-	15,76	Roboter
4	Schweißen	TC	2	1,05	Mensch	17,81	Roboter
5	Schweißen	TC	2	1,05	Roboter	19,46	Roboter
6	Schweißen	OC	2	0,60	Roboter	20,06	Roboter
7	EOL Prüfen	OC	0	0,00	-	20,06	Roboter

Die **Maximierung der Taktzeitreserve** ist aufgrund ihres Gradienten (optimale Zielerreichung bei maximaler Stationszahl) als einkriterielle Untersuchung wenig aussagekräftig. Die im Anwendungsbeispiel maximal mögliche Taktzeitreserve beträgt 48 Sekunden. Sie ergibt sich aus dem vorgegebenen Kundentakt (80 Sekunden) und der längsten, unteilbaren Bearbeitungszeit (30 Sekunden) zzgl. Transferzeit (2 Sekunden). Die Lösung in Abbildung A8.5 findet dieses Optimum und benötigt 20 Stationen, um die Taktzeitreserve auf die obere Schranke von 48 s zu maximieren. Auf eine Diskussion der Linienkonfiguration wird verzichtet.

Die **multikriterielle Optimierung** hat nun einen bestmöglichen Kompromiss der vorgestellten, einkriteriellen Lösungen zum Ziel. Aufgrund der höheren Gewichtung der Kosten ($\lambda_c = 0,6$) liegt eine erwartungsgemäß hohe Ähnlichkeit zur Lösung der einkriteriellen Kostenminimierung vor. Die Anzahl der TCs steigt jedoch auf zwei, was einen Anstieg der Kosten um 2,39 % bzw. des Flächenbedarfs um 5,77 % zur Folge hat. Die gesamte Linienkonfiguration ist in Tabelle 5.10 dargestellt und kommt erneut mit 7 Stationen aus, obwohl eine Taktzeitreserve von 2,37 Sekunden erreicht werden kann. Die Stationsbelegung in Abbildung A8.6 zeigt, dass die toleranzkritischen Bauteile zuletzt verschweißt werden, woraus ein optimaler Qualitätsindex resultiert. Dadurch wird der relativ schwere Querträger bereits an Station 3 beladen, was einen zusätzlichen Transferroboter erfordert. Insgesamt erfolgt die Herstellung der Verbundlenkerachse außer an den Stationen 4 und 5 sehr symmetrisch, obwohl dies nicht als Constraint vorgegeben wird.

Tabelle 5.10: Linienkonfiguration bei multikriterieller Optimierung nach Schäfer & Tse et al. (2025).

Station	Stations-Typ	OC / TC	n Roboter	max. Teilegewicht	Beladen	Gewicht Zwischenprodukt	Transfer
1	Schweißen	OC	1	2,62	Mensch	6,93	Mensch
2	Laserschneiden	OC	1	0,00	-	6,93	Mensch
3	Schweißen	TC	2	7,93	Mensch	15,66	Roboter
4	Schweißen	OC	1	1,05	Mensch	16,71	Roboter
5	Schweißen	OC	2	1,05	Mensch	17,76	Roboter
6	Schweißen	TC	2	0,60	Mensch	20,06	Roboter
7	EOL Prüfen	OC	0	0,00	-	20,06	Roboter

Vergleichende Evaluation und Bewertung

Die Ergebnisse der exakten Optimierung veranschaulichen die Abhängigkeit der Lösung von den zugrundeliegenden Informationen. So wird z. B. bei der jeweils einkriteriellen Minimierung von Kosten und Flächenbedarf das Gesamtgewicht des Zwischenprodukts lange unter 10 kg gehalten, um auf den teureren Roboter-Transfer zu verzichten. Dies ist entsprechend abhängig von den vorliegenden Lohnkosten. Weiter zeigt ein Vergleich der beiden Lösungen, dass sich eine kostengünstige Linienkonfiguration durch die Nutzung von TCs auszeichnet (insbesondere wenn dadurch ein Bearbeitungsroboter eingespart werden kann), während für eine platzsparende Konfiguration genau das Gegenteil gilt. Zuletzt findet die einkriterielle

Qualitätsoptimierung eine Lösung die toleranzkritischen Bauteile spät zu verschweißen, ohne die Abfolgerestriktionen des Vorranggraphen zu verletzen.

Die **multikriterielle Optimierung** findet mit den im Anwendungsfall vorgegebenen Gewichtungsfaktoren eine zufriedenstellende Lösung: Bei Qualitätsindex und Kosten liegt keine bzw. eine vernachlässigbare Zielabweichung vor und auch der Flächenbedarf steigt um weniger als 10 % im Vergleich zum Optimalwert. Die Maximierung der Taktzeitreserve wird jedoch als ein sehr stark konkurrierendes Ziel implementiert und wird daher nahezu ignoriert. Das diskutierte Ergebnis stellt eine Pareto-effiziente Lösung dar. Somit kann kein Zielkriterium weiter verbessert werden, ohne dass ein anderes Zielkriterium dabei verschlechtert wird (vgl. Abschnitt 2.1.3.2).

Der Vollständigkeit halber zeigt Abbildung 5.19 die **Pareto-Kurve** der Zielerreichung bei unterschiedlicher Gewichtung der drei Zielkriterien Kosten λ_c , Flächenbedarf λ_a und Toleranzabweichung λ_d . Für die Taktzeitreserve gilt demnach $\lambda_f = 0$. Mit drei Kriterien und einer 10 % Schrittweite bei der Gewichtung ergeben sich 66 Kombinationsmöglichkeiten. Aufgrund der diskreten Zielwerte liegen die Lösungen teilweise aufeinander, weshalb weniger als 66 Punkte sichtbar sind. Eine hohe Sättigung d. h. ein dunklerer Punkt dient als Indikator für mehrere, aufeinanderliegende Punkte.

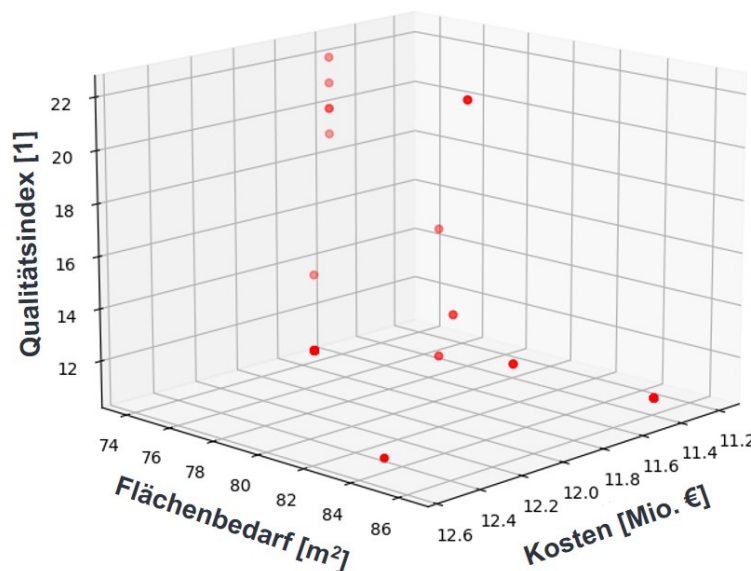


Abbildung 5.19: Darstellung Pareto-effizienter Lösungen anhand der Zielkriterien Kosten, Fläche und Qualität (eigene Darstellung nach Schäfer & Tse et al. 2025).

5.3.3.3 Ergebnisse bei Modellerweiterung I – *coloring*-Algorithmus

Im Folgenden wird kurz auf die Ergebnisse der exakten Optimierung bei Erweiterung des Modells durch den in Abschnitt 4.3.3.8 entwickelten *coloring*-Algorithmus eingegangen. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 5.11 zusammengefasst.

Tabelle 5.11: Übersicht über die Ergebnisse der exakten Optimierung bei Modellerweiterung I in Anlehnung an A_Schneider (2023).

		Stationen [Stück]	Kosten [Mio. €]	Fläche [m ²]	Qualitätsindex [1]	Taktzeitreserve [s]	Laufzeit [s]
einkriteriell	Stationen	7	12,5410	84,52	14	0,00	141,49
	Kosten	7	11,8314	82,52	17	0,00	240,78
	Flächenbedarf	7	12,3810	77,75	16	0,00	78,61
	Qualität	7	12,7810	77,75	11	0,00	57,59
	Taktzeitreserve	25	48,6122	319,83	55	48,00	2249,00
	Optimum	7	11,8314	77,75	11	48,00	-
multikriteriell	absolut	7	12,3536	83,52	11	5,39	743,69
	Zielabweichung	0 %	4,41 %	7,43 %	0 %	-88,78 %	-

Primär fällt auf, dass die Kosten bei allen Lösungen des ersten Erweiterungsmodells höher ausfallen. Am Beispiel der Linienkonfiguration der multikriteriellen Optimierung in Tabelle 5.12 wird der Hintergrund deutlich: Aufgrund der vermehrten Transferaktivitäten bei Modellerweiterung muss teureres Equipment eingesetzt werden, um die vorgegebene Taktzeit zu halten. Weiter zeigt Abbildung A8.7 im Anhang, dass der Querträger bereits an Station 1 beladen wird, was ein Zwischenproduktgewicht von über 10 kg ab Station 1 bedeutet.

Tabelle 5.12: Linienkonfiguration bei multikriterieller Optimierung des 1. Erweiterungsmodells.

Station	Stations-Typ	OC / TC	n Roboter	max. Teilegewicht	Beladen	Gewicht Zwischenprodukt	Transfer
1	Schweißen	OC	1	7,93	Mensch	14,06	Roboter
2	Laserschneiden	OC	1	0,00	-	14,06	Roboter
3	Schweißen	TC	2	0,50	Mensch	15,41	Roboter
4	Schweißen	OC	2	0,60	Mensch	16,01	Roboter
5	Schweißen	TC	2	1,05	Mensch	19,56	Roboter
6	Schweißen	OC	2	0,50	Mensch	20,06	Roboter
7	EOL Prüfen	OC	0	0,00	-	20,06	Roboter

An dieser Stelle ist zu betonen, dass die Zulässigkeit der gefundenen Lösung von der in Abschnitt 4.3.3.8 eingeführten Ordnungsrelation $c_o < c_n$ abhängig ist. Das bedeutet, dass ein Farbwechsel von c_o zu c_n nur zulässig ist, wenn das Teil auf der vorausgehenden Station c_o besitzt. Dadurch kann kein Teil innerhalb nur einer Station zwei Farbwechsel nacheinander erfahren. Das kann anhand eines einfachen Beispiels erläutert werden. Soll innerhalb einer Station Teil A an Teil B dieses anschließend an Teil C angeschweißt werden, so existieren je nach Ordnungsrelation folgende Farbwechsel: Nimmt Teil A zunächst die Farbe von B und dann die Farbe von C an, ist die Lösung unzulässig. Definiert die Ordnungsrelation jedoch, dass die Teile A und C die Farbe von B annehmen, liegt nur ein Farbwechsel vor und die Lösung ist zulässig. Diese Abhängigkeit von der eingeführten Ordnungsrelation existiert nur bei zwei aufeinanderfolgenden Verbindungen von drei Teilen innerhalb einer Station. Um diese Einschränkung des Lösungsraums zu verdeutlichen, wird die Optimierung bei umgekehrter Ordnungsrelation erneut durchgeführt. Das führt erwartungsgemäß zu anderen Ergebnissen, die Tabelle A8.7 im Anhang entnommen werden können. Die Unterschiede zeigen, dass auch hier keine dominante Lösung gefunden wird.

5.3.3.4 Ergebnisse bei Modellerweiterung II – Stationsinternes Scheduling

Die zweite Modellerweiterung integriert eine Möglichkeit zwei Aufgaben trotz vorhandener Ablaufrestriktion derselben Station zuzuweisen. Das ist immer dann erlaubt, wenn die Vorgänger-Aufgabe auf der Station vollständig bearbeitet wird. Ein explizites Scheduling der Aufgaben innerhalb einer Station findet nicht statt. Die Aufgaben werden lediglich entlang des Vorranggraphen sortiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.13 zusammengefasst.

Tabelle 5.13: Übersicht über die Ergebnisse der exakten Optimierung bei Modellerweiterung II in Anlehnung an A_Schukraft (2024).

	Stationen	Kosten	Fläche	Qualitätsindex	Taktzeitreserve	Laufzeit
	[Stück]	[Mio. €]	[m ²]	[1]	[s]	[s]
einkriteriell	Stationen	6	11,1618	80,62	13	0,00
	Kosten	6	10,7344	69,46	14	0,11
	Flächenbedarf	6	10,7344	69,46	14	0,62
	Qualität	6	11,1618	80,62	10	0,00
	Taktzeitreserve	28	48,6122	326,92	44	48,00
	Optimum	6	10,7344	69,46	10	48,00
multikriteriell	absolut	6	10,8944	76,23	10	6,65
	Zielabweichung	0 %	1,49 %	9,75 %	0 %	-86,14 %

Es ist ersichtlich, dass die Modellerweiterung zur Einsparung einer Station auf ein Minimum von nur 6 Stationen führt. Damit einher geht eine Senkung der Kosten um 4,06 % von 11,1892 Mio. Euro auf 10,7344 Mio. Euro sowie des Flächenbedarfs um 5,82 % von 73,75 m² auf 69,46 m² jeweils im Vergleich zur besten exakten Lösung des ALB Modells in Tabelle 5.6. Die multikriterielle Optimierung besitzt eine Zielabweichung von nur 1,49 % der Kosten respektive 9,75 % des Flächenbedarfs. Weiter erreicht die Lösung eine vergleichsweise hohe Taktzeitreserve von 6,65 Sekunden. Die Linienkonfiguration ist in Tabelle 5.14 dargestellt.

Tabelle 5.14: Linienkonfiguration bei multikriterieller Optimierung des 2. Erweiterungsmodells.

Station	Stations-Typ	OC / TC	n Roboter	max. Teilegewicht	Beladen	Gewicht Zwischenprodukt	Transfer
1	Schweißen	TC	2	7,93	Mensch	14,41	Roboter
2	Laserschneiden	OC	1	0,00	-	14,41	Roboter
3	Schweißen	TC	2	1,05	Mensch	17,81	Roboter
4	Schweißen	OC	2	0,00	Mensch	17,81	Roboter
5	Schweißen	TC	2	0,60	Mensch	20,06	Roboter
6	EOL Prüfen	OC	0	0,00	-	20,06	Roboter

Wenig überraschend werden die vier notwendigen Schweißstationen mit jeweils zwei Robotern ausgestattet. Ebenso findet der Transfer wie aus den anderen Lösungen bekannt ausschließlich per Roboter und die Beladung der Anbauteile ausschließlich manuell statt. Eine Analyse der Stationszuordnung in Abbildung A8.8 zeigt, dass die Lösung zwar formal zulässig, in der Realität jedoch ohne weitere Prüfung nur eingeschränkt verwertbar ist. Durch die Modellerweiterung werden Bauteile früher beladen und teils asymmetrisch gefügt, was in der Realität komplexere und damit teure Vorrichtungen bedingen würde, die eine Zugänglichkeit der Schweißnähte nicht garantieren könnten.

5.4 Visualisierung und Simulation des Produktionssystems

Das multikriteriell optimierte, variantenspezifische Produktionssystem liegt als Lösung in der im vorausgehenden Kapitel 5.3 beschriebenen Form vor. Dabei geht es um eine möglichst schnelle, erste Bestimmung der Produktionskosten anhand von erfahrungsbasierten Annahmen und Zusammenhängen. Im letzten Schritt der assistierten Produktionssystemplanung folgt nun die Integration der Lösung in eine durchgängig digitale Systemlandschaft. Dazu wird dem Anwender das vorliegende Planungsergebnis als digitales (Simulations-) Modell, das mit der Lösung aus Schritt 3 konfiguriert wird, zur weiteren Nutzung zur Verfügung gestellt. Im Anwendungsbeispiel des Zulieferers sind die beiden Beispiele der anschließenden, manuellen Detaillayoutplanung sowie der Hochlaufplanung von Interesse. Die folgenden Ausführungen orientieren sich an den Phasen (**fett** markiert) aus Abbildung 4.32, fokussieren jedoch speziell die Modellierung und Implementierung (5.4.1) bzw. Experimentdurchführung (5.4.2).

5.4.1 Modulare 3D-Simulation zur Layoutplanung

Die Layoutplanung stellt einen Teil der Detailplanung dar und integriert das idealisiert optimierte Planungsergebnis in die reale Fabrik. Dabei können anhand der vorliegenden Freiheitsgrade weitere Optimierungspotentiale gehoben werden. **Ziel** der Anwendung ist die Integration des digitalen Modells zur Inbetriebnahme der realen Produktionslinie und der langfristigen Nutzung als digitalen Zwilling während dem Betrieb der Produktion. Im Rahmen der 3D-Simulation ist dabei ein Trade-Off zwischen **Modellierungstiefe** und echtzeitfähiger Ausführbarkeit der Modelle zu wählen. Für die **Modulidentifikation** in Abbildung 5.20 wird das im eigenen Ansatz vorgestellte Schema (Abbildung 4.33) und das im Anwendungsbeispiel entwickelte SysML Produktionssystemmodell (Tabelle 5.2) verwendet.


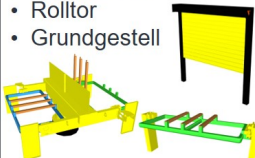

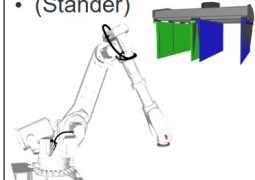
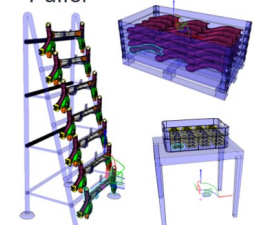
Peripheriemodul	Basismodul	Prozessmodul	Transportmodul	Puffermodul
<ul style="list-style-type: none"> • Quellen • Senken • Werker 	<ul style="list-style-type: none"> • Drehtisch (TC) oder Spanntisch (OC) • Umzäunung • Rolltor • Grundgestell 	<ul style="list-style-type: none"> • Bearbeitungsroboter • Roboterwerkzeug • (Ständer) 	<ul style="list-style-type: none"> • Handhabungsroboter • Greifer • (Ständer) 	<ul style="list-style-type: none"> • Puffer 
IT Elemente	IT Elemente	IT Elemente	IT Elemente	IT Elemente
<ul style="list-style-type: none"> • Controller für Werker • Logik der Quellen und Senken 	<ul style="list-style-type: none"> • Logik des Tisches • Zykluszeitmessung 	<ul style="list-style-type: none"> • Controller für Roboter • Roboterprogramm 	<ul style="list-style-type: none"> • Controller für Roboter • Roboterprogramm 	<ul style="list-style-type: none"> • Logik der Puffer

Abbildung 5.20: Identifizierte Module der 3D-Simulation (eigene Darstellung).

Die Phase der **Modellierung** konzentriert sich auf die Abbildung des Stationsverhaltens. Hierzu wird zunächst die Wirkstruktur einer Station als erstes Partialmodell der Spezifikationstechnik CONSENS nach Gausemeier & Brandis et al. (2012) formalisiert. In den Wirkstrukturmodellen werden die zuvor definierten Module entsprechend kombiniert und über standardisierte Schnittstellen mit Material- und Informationsflüssen verbunden. Abbildung 5.21 zeigt die sequentielle Verkettung einer OC mit Spanntisch und einer TC mit Drehtisch über die Ergänzung eines Umfeldelements.

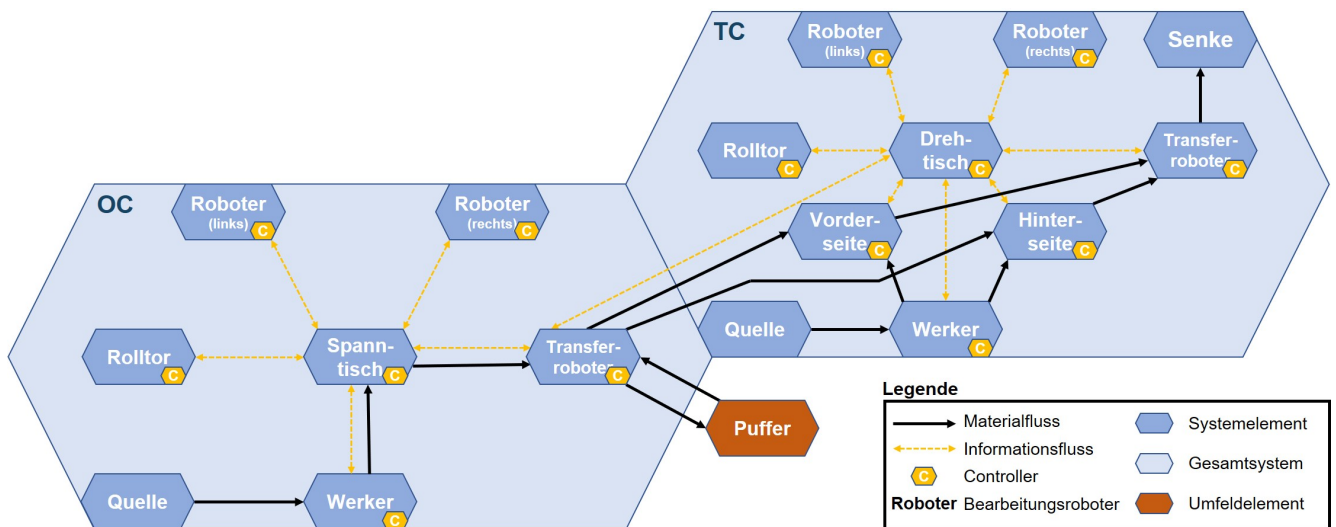


Abbildung 5.21: Wirkstrukturmodell der Verkettung von OC und TC (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).

Zur detaillierten Nachvollziehbarkeit der Abfolge aller relevanten Abläufe innerhalb einer Station werden diese als Grafcet Diagramm formalisiert. Die Diagramme einer exemplarischen OC (Abbildung A9.1) und TC (Abbildung A9.2) sind in Anhang A9 dargestellt. Es wird farblich zwischen Bearbeitungs- und Handhabungsprozessen unterschieden. Die zugehörigen Abläufe werden über die Grafcet Notation entweder sequentiell (OC) oder parallel (TC) visualisiert. Weiter wird jedem noch so kleinen Schritt in dem Grafcet Diagramm eine ausführende Ressource zugeordnet. Zuletzt werden die Schaltpläne modular verschachtelt, d. h. generalisierte Subroutinen werden bedarfsorientiert aufgerufen. Das erlaubt eine produkt- bzw. variantenunspezifische Implementierung.

Die **Implementierung** der 3D-Simulation in Visual Components beginnt mit der Modellierung und Kinematisierung der identifizierten Module. Basierend darauf können die Stationen gemäß der Wirkstrukturmodelle aufgebaut werden. Das Hauptaugenmerk der Implementierung liegt schließlich auf der modularen Umsetzung von Informations- und Materialfluss über Prozessknoten. Das Ziel dabei ist, die Abläufe innerhalb der Stationen universell d. h. unabhängig von produktspezifischen Prozessschritten zu programmieren. (Schäfer & Freund 2024) Dazu werden je Stationstyp folgende Schritte durchgeführt (Tabelle 5.15):

Tabelle 5.15: Implementierung in Visual Components.

Anlegen	der Prozessknoten von Quellen und Senken, Handhabungs- und Bearbeitungsprozessen sowie Controllern der kinematisierten Gelenke.
Konfiguration	der Prozessknoten bzw. <i>Process Executors</i> von Quelle und Senke und Verknüpfung der Schnittstelle zwischen Mitarbeiter und dessen Controller.
Konfiguration	des Prozessablaufs der Controller des kinematisierten Equipments (das Beispiel eines Drehtischs ist in Abbildung A9.3 enthalten).
Konfiguration	des Prozessablaufs der Handhabungs- und Bearbeitungsplätze (siehe analog Abbildung A9.4 respektive Abbildung A9.5).
Synchronisierung	der Prozessknoten gemäß der Grafnet Diagramme über die Einführung boolescher Signale und zugehöriger Wartebedingungen.
Festlegung	des Prozessablaufs als Reihenfolge aller <i>Process Executors</i> .
Konfiguration	des Materialflusses über Transportknoten und deren Zuordnung zu Transportressourcen.
Konfiguration	der räumlichen Bewegungspunkte des Unterprogramms der Bearbeitungsroboter abhängig von der 3D-Geometrie der Bauteile.

Die so über standardisierte Punkte synchronisierten Ablaufstrukturen der Stationen ermöglichen schließlich eine modulare Programmierung der Verkettung mehrerer Stationen, wie es Abbildung 5.22 am Beispiel von zwei Stationen darstellt. Durch die Wahl geeigneter Systemgrenzen und Schnittstellen sind nur die Prozessknoten der Umfeldelemente wie z. B. Puffer zu konfigurieren. Anschließend wird die Gesamtheit aller Stationen des Baukastens als Modulkatalog verfügbar gemacht und der Anwender kann diese per *drag and drop* einfach kombinieren. Das Visual Components Modell der Prozessknoten einer exemplarischen Linie und der resultierende Materialfluss sind in Abbildung A9.7 im Anhang visualisiert.

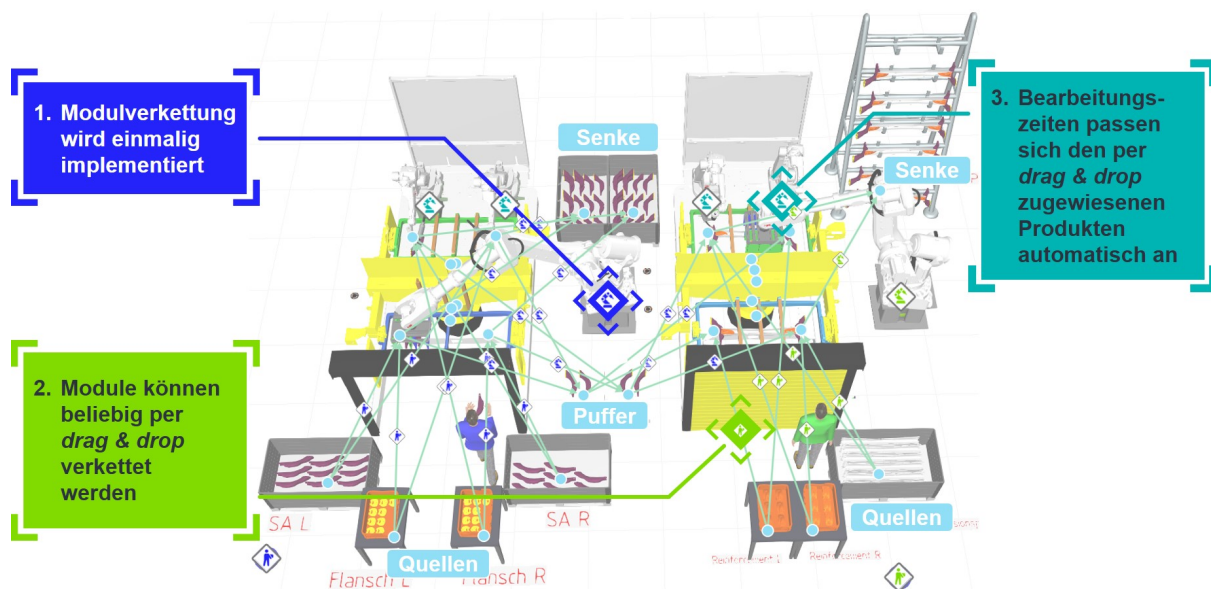


Abbildung 5.22: Materialfluss von zwei exemplarisch verketteten Stationen mit Drehtisch, Robotertransfer und manueller Beladung der Anbauteile (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).

Für die letzte Phase der **Nutzung** des digitalen Modells wird beispielhaft auf eine mögliche Variation des Layouts eingegangen. Zur Verfügung steht eine exemplarische Linienkonfiguration aus Schritt 3 der assistierten Produktionssystemplanung, die über die implementierten Stationen (siehe Abbildung A9.6) zunächst als einfache I-Linie dargestellt wird (siehe Abbildung A9.7). Die Integration der Lösung in die 3D-Simulation erlaubt dem Anwender die Manipulation des Layouts, um weitere Optimierungspotenziale zu heben. Hierzu kann anhand der Simulation einer Schicht bspw. die Auslastung der Werker zur Beladung der Stationen analysiert werden. Durch die in Abbildung 5.23 dargestellte Anpassung des Layouts d. h. die Optimierung der Laufwege und die asynchrone Beladung der Stationen innerhalb eines Takts ist z. B. eine Einsparung von zwei Werkern bei konstanter Ausbringung der Linie möglich. Zusätzlich kann die 3D-Simulation im Rahmen der Detailplanung beim Zulieferer zur Roboterbahnplanung beim Schweißen oder für Kollisionsanalysen verwendet werden, um die Güte der Linienausstattung weiter zu verbessern.

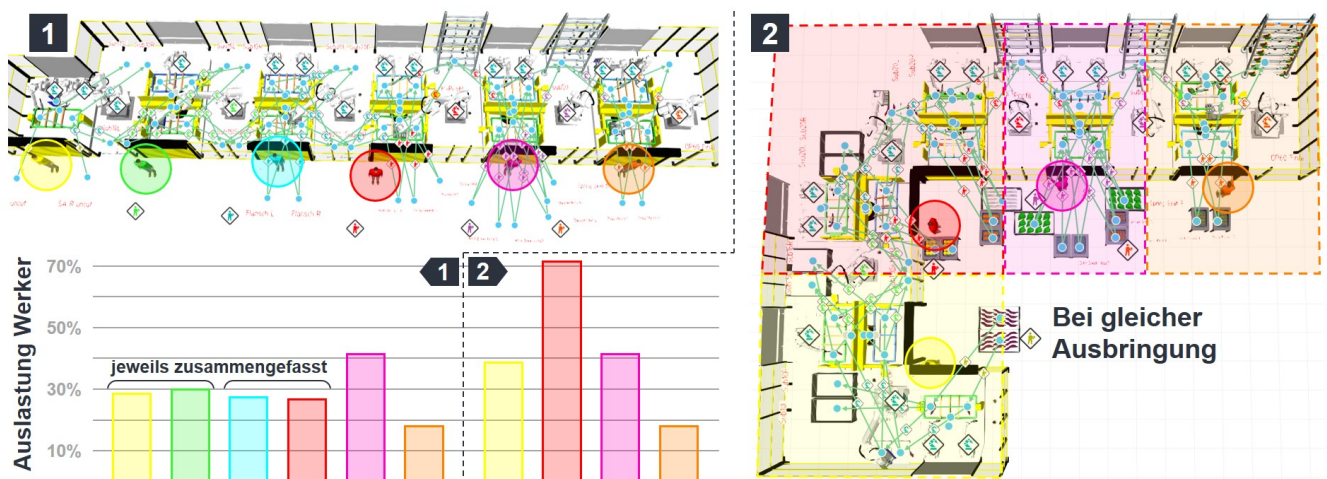


Abbildung 5.23: Nutzung zur 3D-Layoutplanung (eigene Darstellung).

5.4.2 Modular skalierbare Ablaufsimulation zur Hochlaufplanung

Das Skalieren der Linienkonfiguration stellt eine weitere Möglichkeit dar, wie das Planungsergebnis weiter genutzt werden kann. Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, basiert die Austaktung der Linie zunächst auf dem geplanten Absatzvolumen der Kundennachfrage. Für den Hochlauf der Linie sowie Nachfragespitzen ist eine geschickte, modulare Skalierung des Produktionssystems erforderlich. Da die Zusammenhänge zwischen Einflussparametern wie bspw. dem Automatisierungsgrad oder dem Schichtmodell und der resultierenden Ausbringung oder den Stückkosten sehr komplex sind, geraten statische Berechnungen schnell an ihre Grenzen. Hier erlaubt der eigene Ansatz der assistierten Produktionssystemplanung die Konfiguration einer Ablaufsimulation zur Analyse solcher Zusammenhänge, um schließlich optimale Skalierungspfade zu entwickeln. Das Potential wird in Anhang A9.2 am Beispiel eines Produktionshochlaufs kurz elaboriert.

5.5 Validierung

Die folgende Validierung hat den Vergleich des vorgestellten, eigenen Ansatzes zur assistierten Produktionsplanung mit der aktuell vorliegenden, manuellen Planung beim Zulieferer zum Ziel. Dabei gliedert sich die Validierung in einen qualitativen Vergleich der Planungsschritte und einen quantitativen Vergleich eines exemplarischen Planungsergebnisses. Hierzu wird zunächst genauer auf die manuelle Planung im Anwendungsbeispiel eingegangen, die in Abbildung 5.24 dargestellt ist.

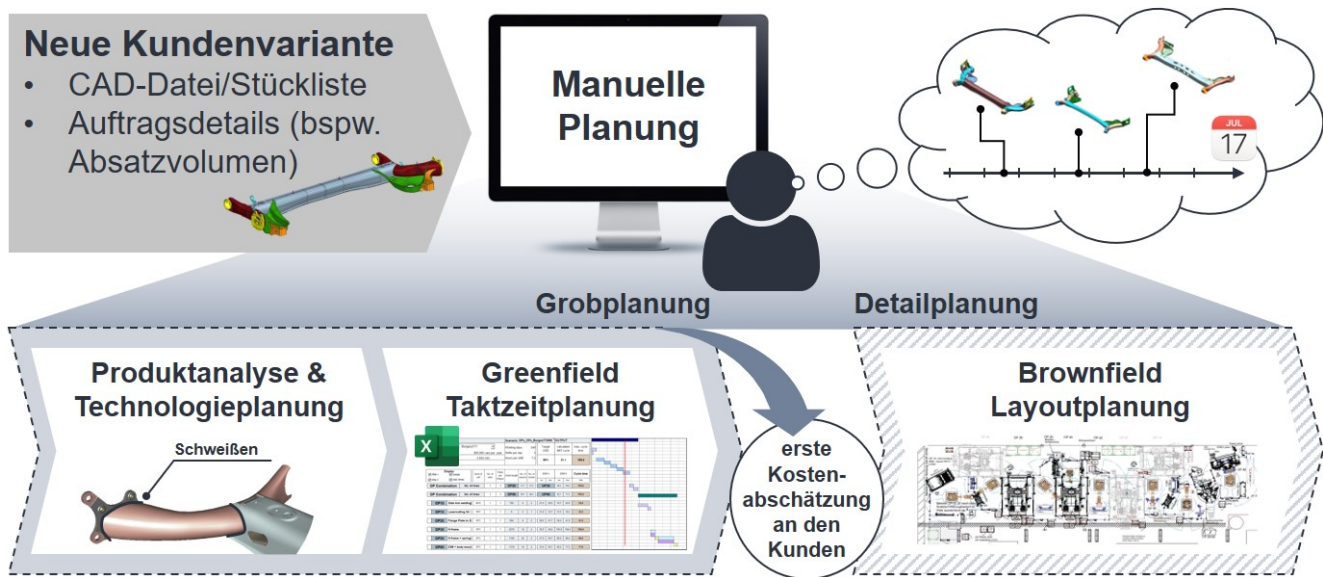


Abbildung 5.24: Manueller Planungsprozess beim Zulieferer (eigene Darstellung).

Im betrachteten Beispiel befasst sich der Planer mit der variantenspezifischen Gestaltung einer *Assembly Line* (AL) basierend auf dem vorliegenden Produktdesign einer Verbundlenkerachse. Um die Planung nicht von Null an beginnen zu müssen, wird meist der Planungsstand der ähnlichsten, bereits produzierten Produktvariante als Basis verwendet. Diese Produktanalyse fußt auf der Erfahrung des Planers. Dazu gehört am Beispiel des RTB auch das notwendige Wissen über die Schweißnahtplanung und die Ableitung der notwendigen Produktionsprozesse. Den Kern der Planung stellt schließlich die Austakung der AL dar. Hierzu wird eine Excel-Tabelle verwendet, welche die erforderlichen Planzeitzusammenhänge enthält. Der Planer ordnet die identifizierten Produktionsprozesse (i. A. Aufgaben) den zu konfigurierenden Stationen zu, während Excel die resultierenden Herstellungskosten sowie die Taktzeit der AL kalkuliert. Das Ergebnis wird in Form von Gantt-Diagrammen visualisiert. Für die anschließende Detaillayoutplanung werden 2D-Zeichnungen verwendet. Der **qualitative Vergleich** mit dem in Kapitel 4 vorgestellten eigenen Ansatz verdeutlicht dessen Vorteile:

1. Statt einer auf Erfahrung limitierten Produktanalyse können Ähnlichkeiten zwischen allen digital vorliegenden Produktvarianten und Bauteilen quantifiziert und genutzt werden.

2. Statt einer erfahrungsbasierten Prozessplanung kann personengebundenen Wissen in Form von Planungsregeln formalisiert und bei der Ableitung eines variantenspezifischen Prozessvorranggraphen genutzt werden.
3. Statt einer manuellen Austaktung der Linie werden mehrere, gewichtete Zielkriterien bei der Optimierung der Linienkonfiguration explizit berücksichtigt.
4. Statt einer eingeschränkten Visualisierung des Planungsergebnisses (Excel und Power-Point) wird dieses als digitales (Simulations-) Modell in den Planungsprozess integriert.

Durch diese Assistenz des Menschen bei der Produktionssystemplanung lässt sich die variantenspezifische Planungszeit um ca. 20 %¹ reduzieren. Die gesteigerte Effizienz kann zu einer indirekten Einsparung von Lohnkosten führen. Für den Vergleich wird in Abbildung 5.25 ein exemplarisches Ergebnis der manuellen Planung dargestellt (Details siehe Tabelle A10.1). Die zugrundeliegende RTB-Variante stimmt mit der in Kapitel 5.3 verwendeten Variante überein.

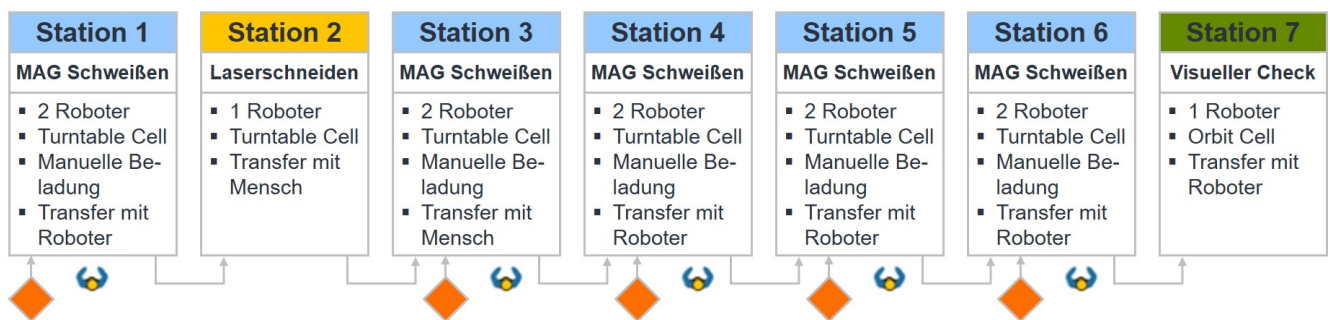


Abbildung 5.25: Ergebnis der manuellen Planung beim Zulieferer (eigene Darstellung).

Die Linie besteht aus insgesamt 7 Stationen, 5 zum Schweißen, eine zum Laserschneiden und eine zum visuellen Prüfen. Dabei werden 5 Werker zur Beladung der Stationen benötigt. Ab Station 3 findet der Transport über Roboter statt. Vier der fünf Schweißstationen werden als TC konfiguriert, während alle fünf über jeweils zwei Schweißroboter verfügen. Die manuelle Austaktung der Linie zeichnet sich durch eine symmetrische Bearbeitung der Verbundlenkerachse aus. In Tabelle 5.16 ist dargestellt, welche Bauteile an welcher Station verschweißt werden. Es ist ersichtlich, dass die algorithmische Optimierung der Linie diese symmetrische Bearbeitung weitgehend nachahmt, ohne dass dies als Constraint explizit vorgegeben ist. Insgesamt werden zwei Drittel der Aufgaben rechts und links (r/l) parallel durchgeführt.

¹ Ergebnis von Gesprächen im Rahmen des vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung* (BMBF) öffentlich geförderten Verbundprojekts *Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems* (Mo-SyS): Ein erfahrener Planer benötigt für eine variantenspezifische (Grob-) Planung (d. h. ohne bspw. eine nachfolgende Roboterbahnplanung) der betrachteten Linie durchschnittlich ca. 5 Arbeitstage. Mit dem vorgestellten eigenen Ansatz (Produktanalyse, Identifikation Produktionsprozesse, Line Balancing, Ausgabe als manipulierbares, digitales Modell) kann der erste Planungstag (8h) eingespart werden. Eine sehr grobe Einschätzung der erwarteten Herstellkosten ist damit bereits nach wenigen Stunden möglich.

Tabelle 5.16: Qualitativer Vergleich der Linienkonfiguration.

Typ	Manuelle Planung	Multikrit. Optimierung ALB Modell
1 Schweißen	- Längslenker (r/l)	- Längslenker (r/l) - Mutter & Dämpferkonsole (r/l)
2 Laserschn.	- Längslenker (r/l)	- Längslenker (r/l)
3 Schweißen	- Adapterplatte (r/l)	- Verstärkungsblech & Längslenker (r/l) - Längslenker & Querträger (r/l) - Verstärkungsblech & Querträger (l)
4 Schweißen	- Längslenker & Querträger (r/l) - Verstärkungsblech (r/l)	- Verstärkungsblech & Querträger (r) - Dämpferkonsole & Federteller (l) - Dämpferkonsole & Längslenker (l)
5 Schweißen	- Mutter & Dämpferkonsole (r/l) - Längslenker & Querträger (r/l) - Federteller & Längslenker (r/l) - Federteller & Querträger (r/l) - Dämpferkonsole & Federteller (r/l) - Dämpferkonsole & Längslenker (r/l) - Bremsschlauchhalter (r/l)	- Dämpferkonsole & Federteller (r) - Dämpferkonsole & Längslenker (r) - Federteller & Querträger (r/l) - Federteller & Längslenker (r/l) - Federteller & Dämpferkonsole (r/l)
6 Schweißen	- Lagerbuchse & Längslenker (r/l) - Federteller & Dämpferkonsole (r/l) - Federteller & Längslenker (r/l)	- Lagerbuchse & Längslenker (r/l) - Adapterplatte & Längslenker (r/l) - Bremsschlauchhalter (r/l)
7 Prüfen	- Visuelle EOL Prüfung	- Visuelle EOL Prüfung

Der **quantitative Vergleich** der Lösung erfolgt anhand der verwendeten Zielkriterien Kosten, Flächenbedarf, Qualität und Taktzeitreserve. Hierbei ist anzumerken, dass bei der manuellen Planung ausschließlich die Kostenminimierung explizite Berücksichtigung findet. Die Faktoren Qualität und Ergonomie berücksichtigt der Planer implizit, indem toleranzkritische Bauteile möglichst spät verschweißt und Gewichtslimits nicht überschritten werden sollten. Zuletzt wird die Flexibilität (als Flächenbedarf und Taktzeitreserve) manuell nicht berücksichtigt. Die in Abbildung 5.25 dargestellte Lösung wird daher a posteriori bewertet. Der Vergleich mit der algorithmischen Planung in Tabelle 5.17 zeigt, dass diese eine insgesamt bessere Lösung findet. Eine Diskussion der Lösungen mit erfahrenen Planern zeigt, dass das zum Teil auf berechnete Annahmen zurückzuführen ist. Im Allgemeinen liegt der Vorteil der multikriteriellen Optimierung jedoch ganz klar in der globalen Vergleichbarkeit der Lösungen, indem die Auswirkung einer Änderung der Linienkonfiguration auf mehrere Zielkriterien (z. B. Kosteneinsparung bei Verschlechterung der Qualität) quantifizierbar ist.

Tabelle 5.17: Quantitativer Vergleich der Lösungen nach Schäfer & Tse et al. (2025).

	Stationen [Stück]	Kosten [Mio. €]	Fläche [m ²]	Qualitäts- index [1]	Taktzeit- reserve [s]
Manuelle Planung	7	12,8210	142,142	17	0,00
ALB Modell (multikrit.)	7	11,4566	80,52	11	2,37
Erweiterungsmodell II (multikrit.)	6	10,8944	76,23	10	6,65

6 Diskussion und Ausblick

Im Rahmen dieses Kapitels 6.1 wird diskutiert, inwiefern der vorgestellte, eigene Ansatz die in Kapitel 3.1 eingeführten Anforderungen an eine assistierte Produktionssystemplanung erfüllt und welche Limitationen vorliegen. Zur Beantwortung der vier zentralen, forschungsleitenden Fragestellungen werden die elementaren Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst, um schließlich darzulegen, wie das in Kapitel 3.3 abgeleitete Forschungsdefizit behoben wird. Auf Basis dieser Bewertung werden im Rahmen des Ausblicks 6.2 zukünftige Forschungsbedarfe zur Weiterentwicklung des Ansatzes sowie Handlungsempfehlungen hinsichtlich einer industriellen Umsetzung und Einführung formuliert.

6.1 Diskussion

Die assistierte Produktionssystemplanung setzt aufgrund ihres stark multidisziplinären Charakters neben der Produktionsforschung Fachwissen verschiedenster Disziplinen wie der Produktentwicklung, der Informationstechnik und der Optimierung und Simulation voraus. Die zentrale Stärke des präsentierten eigenen Ansatzes liegt in der Kombination der folgenden vier Teildisziplinen für eine durchgängig digitale Produktionsplanung: (Schäfer & Frank et al. 2022)

- A** Der eigene Ansatz beginnt mit einer Produktanalyse, welche direkt auf gängigen, zum Zeitpunkt der Grobplanung vorliegenden Produktdaten wie bspw. CAD-Modellen und Stücklisten basiert.
- B** Weiter berücksichtigt der eigene Ansatz implizit vorliegende Informationen wie bspw. Metadaten und personengebundenen Erfahrungswissen, welche als Wechselwirkungen in einem ganzheitlichen PPR-Modell formalisiert und für wiederkehrende Planungsaktivitäten nutzbar gemacht werden.
- C** Im Kern kombiniert der eigene Ansatz die betriebsmittelunabhängige Ableitung des Prozessvorranggraphen mit dem *Assembly Line Balancing* (ALB), d. h. einer betriebsmittelbezogenen Optimierung der Zuordnung von Aufgaben zu Stationen im Sinne einer Produktionsfolge.
- D** Zuletzt wird das Planungsergebnis des eigenen Ansatzes in einem modular aufgebauten, digitalen (Simulations-) Modell ausgegeben, was in nachfolgenden Planungsphasen bis hin zum realen Betrieb der Produktion vielseitig genutzt werden kann.

Im Rahmen der Analyse des zugehörigen Stands der Forschung dieser vier Teildisziplinen können vier Forschungsfragen abgeleitet werden, deren Beantwortung im Folgenden bzgl. der Erkenntnisse und Limitationen dieser Arbeit diskutiert wird.

FF1 Welche Repräsentation und welcher Lösungsansatz eignet sich, um Ähnlichkeiten zwischen produzierten und angefragten Produktvarianten bei der Produktionssystemplanung zu nutzen?

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zeigen, dass die Eignung eines Lösungsansatzes zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten von der vorliegenden Datenbasis und deren Repräsentation abhängt. Als Forschungsbeitrag der Arbeit wird dieser Zusammenhang zwischen Anwendungsfall und Lösungsverfahren in einer Auswahlhilfe formalisiert.

Im Gegensatz zur Mehrzahl der in der Literatur vorliegenden Ansätze thematisiert die in Kapitel 4.1 vorgestellte Methode damit verschiedene Input-Daten **[A1]** und Lösungsansätze **[A2]** und kombiniert diese in einem ganzheitlichen Vorgehen (Schäfer & Tremml et al. 2023). Im Vergleich zur manuellen Analyse ermöglichen die computergestützten Verfahren eine Quantifikation der Ähnlichkeitsanalyse. Das Clustering von geometriebeschreibenden Merkmalen ist für die Identifikation spezifischer Bauteilvarianten nur eingeschränkt geeignet. Die Verwendung der Kombination aus Punktwolken und Autoencoder wie in Yang & Feng et al. (2017) und Krahe (2023) ermöglicht es, selbstständig die für die Ähnlichkeitsanalyse relevanten Merkmale zu extrahieren, erfordert jedoch gleichzeitig eine große Menge an Trainingsdaten **[A3]**. Diese liegen im betrachteten Anwendungsfall nur eingeschränkt vor und werden synthetisch ergänzt. Die Abstraktion der lokalen Bauteilgeometrie z. B. anhand von sog. QUICCI-Deskriptoren nach van Blokland & Theoharis (2021) erweist sich hierbei als vielversprechende Alternative. In diesem Fall findet im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstmalig eine Anwendung des Lösungsansatzes mit realen Daten aus der Industrie **[A4]** statt. Die quantitative Analyse der Genauigkeit dieser lokalen Ähnlichkeitsanalyse ist jedoch aufgrund der fehlenden *ground truth* eingeschränkt. Eine qualitative Experteneinschätzung zeigt jedoch, dass der Ansatz grundsätzlich ähnliche Geometrien findet. Zuletzt sollen im Rahmen der Produktanalyse die für die nachfolgende Prozessplanung notwendigen, produktionsrelevanten Produktmerkmale **[A5]** identifiziert werden. Durch den Aufbau eines datengetriebenen Produktbaukastens und die Kombination der verschiedenen Lösungsansätze ist dies vollumfänglich sowohl für Features der Teilefertigung als auch Fügeverbindungen wie z. B. Schweißnähte möglich.

Abschließend hängt die Beantwortung von *FF1* somit von der vorliegenden Datenbasis ab. Im betrachteten, industriellen Anwendungsbeispiel weniger, flächiger Bauteile eignet sich eine Kombination der präsentierten Lösungsverfahren, um eventuelle Nachteile auszugleichen. Einschränkungen des Ansatzes ergeben sich bei gänzlich unbekannten, neuen Produkten, die zunächst manuell klassifiziert und zum Produktbaukasten hinzugefügt werden müssen.

FF2 Wie kann ein betriebsmittelunabhängiger Prozessvorranggraph basierend auf Produktinformationen inkl. der Berücksichtigung von nicht explizit vorhandenen Metadaten und personengebundenem Erfahrungswissen erstellt werden?

Die mit *FF2* angesprochene Planungsaufgabe wird in der Literatur als Prozess- bzw. Technologiekettenplanung bezeichnet. Der Fokus existierender Ansätze wie bspw. Jacob & Windhuber et al. (2018) liegt meist auf der Formalisierung allgemeiner Zusammenhänge zwischen Produktfeatures (z. B. Loch) und Produktionsprozessen (z. B. Bohrung) sowie deren technologischer Abfolgerestriktionen (z. B. Urformen vor Trennen) zur Optimierung einer betriebsmittelunabhängigen Prozessfolge. Darüber hinaus liegen in der industriellen Planung jedoch anwendungsspezifische Zusammenhänge zwischen Produkteigenschaften und der Notwendigkeit bestimmter Produktionsprozesse vor. Dieses Fachwissen ist meist personengebunden und abhängig von der Erfahrung des Planers. Zur Beantwortung von *FF2* werden diese Zusammenhänge im Rahmen des eigenen Ansatzes der vorliegenden Forschungsarbeit daher explizit modelliert und zur Ableitung eines variantenspezifischen Prozessvorranggraphen verwendet.

Im Bereich mechatronischer Produkte **[B1]** hat sich für die Formalisierung solcher Systemzusammenhänge das *Model-Based Systems Engineering* (MBSE) etabliert. Der eigene Ansatz überträgt dieses Konzept auf Produktionssysteme **[B2]** und fokussiert die Modellierung von Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Produktionssystemmodell **[B3]**. Die übertragbare MoSyS-Ontologie nach Schäfer & Günther et al. (2023) definiert zur Verknüpfung von Produkt und Produktion eine betriebsmittelunabhängige Prozessebene, was eine konstante Modellierung sicherstellt. Die fokussierten PPR-Wechselwirkungen umfassen sowohl Beziehungen zwischen Systemelementen als auch Constraints zwischen spezifischen Attributen. Somit können im Vergleich zum Stand der Forschung Planungsregeln explizit in SysML-Profilen abgebildet und damit nutzbar gemacht werden. Das reduziert zwar den manuellen Aufwand bei der wiederkehrenden, variantenspezifischen Planung, erzeugt jedoch gleichzeitig einen besonders hohen Aufwand zur initialen Modellbildung. Um dieses Defizit aufzuheben, werden im Rahmen der vorgestellten Methode Möglichkeiten zur datengetriebenen Ermittlung von Planzusammenhängen am Beispiel der Planzeit untersucht. Eine automatisierte Integration der resultierenden Zusammenhänge als Beziehungen in SysML-Modellen bleibt jedoch aus.

FF3 Wie kann unter Einhaltung der Vorrangbeziehungen ein hinsichtlich mehrerer Zielkriterien optimales Produktionssystem bestimmt werden?

Mit der Beantwortung von *FF3* befasst sich das Forschungsgebiet des ALB. Wie der Stand der Forschung in Kapitel 3.2.4 zeigt, existiert eine Vielzahl von Ansätzen zur Optimierung der Zuweisung von Aufgaben zu Stationen. Gleichzeitig wird diese Aufgabe in der industriellen Praxis jedoch meist manuell durchgeführt. Ein Grund dafür kann die in der Literatur sehr starke Vereinfachung des realen Problems unter idealisierten Annahmen sein (vgl. Boysen & Fliedner et al. 2007). Daher betrachtet diese Arbeit ein industrielles Anwendungsbeispiel **[C1]** bei einer möglichst realen mathematischen Modellierung des zugrundeliegenden Problems.

Hierzu wird im Sinne des *data-driven development* nach Bach & Langner et al. (2017) zunächst ein lauffähiges Minimalbeispiel aufgestellt (Schäfer & Kochendörfer et al. 2023), welches anschließend iterativ ergänzt wird (Schäfer & Tse et al. 2024). Im Kern verwendet die vorliegende Arbeit schließlich den Default-Solver Gurobi zur exakten Optimierung **[C5]** einer multikriteriellen Zielfunktion **[C2]**. Für die Zieldimensionen Kosten, Qualität, Zeit und Flexibilität (Ergonomie zusätzlich als Nebenbedingung) werden messbare Zielkriterien eingeführt und gewichtet. Die verwendete Methode der Skalarisierung mit gewichteter Summe garantiert bei gemischt-ganzzahliger Optimierung jedoch nur eine schwache Pareto-Effizienz der Lösung (Hillier & Miettinen 1998). Das meint, dass nicht alle Ziele ohne eine Verschlechterung mindestens eines Ziels verbessert werden können. Bei nicht-konvexer Pareto-Front könnten pareto-effiziente Punkte im nicht-konvexen Teil nicht gefunden werden (Burachik & Kaya et al. 2022). Das entwickelte mathematische Modell stellt einen sinnvollen Kompromiss zwischen effizienter Lösbarkeit und hohem Detailgrad dar. Ein Vergleich mit der in Kapitel 2.1.3.1 eingeführten Charakterisierung nach Boysen & Fliedner et al. (2007) sowie die in der Literatur gängigen Annahmen nach Chutima (2022) zeigen die Komplexität des betrachteten Problems. Aufgaben werden je nach Aufgabentyp einem bestimmten Stationstyp zugewiesen. Diese Zuweisung wird durch die Abfolgerestriktionen des Vorranggraphen limitiert. Die Auswahl des Stationsequipments beeinflusst dabei die Funktion der Station. Mit bis zu zwei Robotern je Station ergibt sich ein *multi-manned* AL-Design **[C3]**. Weiter werden equipmentabhängige, unproduktive Zeiten explizit mitberücksichtigt. Als erste Forschungsarbeit berücksichtigt die vorliegende Arbeit die Teilbarkeit von Aufgaben bei der Zuweisung zu mehreren Stationen **[C4]**. An einzelnen Stellen wie bspw. der übergebenen Zwischenprodukte oder dem stationsinternem Scheduling trifft das neu entwickelte ALB Modell zunächst vereinfachende Annahmen. Für ersteres wird eine Modellerweiterung inkl. *coloring*-Algorithmus entwickelt. Der Vorteil darin besteht in der Zulässigkeit der Lösung in Bezug auf den Transfer unverbundener Subteile. Der Nachteil geht aus der Abhängigkeit der Lösung von der eingeführten Ordnungsrelation einher. Das zunächst mangelnde stationsinterne Scheduling wird als Grund für die teils asynchrone Bearbeitung des Produkts im Anwendungsbeispiel gesehen. Hierfür wird in einer zweiten Modellerweiterung eine Zwischenlösung entwickelt, welche die Zuweisung von Nachfolger-Aufgaben zur selben Station zulässt.

Mit Bezug auf die Qualität der gefundenen Lösung ist die Abhängigkeit der Lösung von einer Veränderung der Nachfragemenge zu diskutieren. Während die Ausbringung jederzeit reduziert werden kann, ist eine Steigerung des Absatzes durch die Taktzeitreserve limitiert. Die gefundene, maximale Taktzeitreserve i. H. v. 6,65 Sekunden entspricht einer maximal möglichen Steigerung der jährlichen Ausbringung um 9,5 %. Im Allgemeinen erlaubt die multi-kriterielle Optimierung im Vergleich zur manuellen Planung eine explizite Berücksichtigung mehrerer Zielkriterien bei einer Zeitersparnis in der Planung von ca. 8h.

FF4 Wie kann das Planungsergebnis für nachfolgende Planungsschritte über zuvor festgelegte Parameter mit einem digitalen Modell modular visualisiert und simuliert werden?

Zur Beantwortung von FF4 wird ein modularer Anlagenbaukasten **[D2]** implementiert. Hierbei ist anzumerken, dass es keine *one-fits-all* Lösung für alle denkbaren Aufgaben der nachfolgenden Detailplanung gibt. Im Bereich der Simulation von Produktionssystemen besitzen einzelne Softwaretools verschiedene, teils komplementäre Vor- und Nachteile und sind damit unterschiedlich geeignet (vgl. Tabelle A11.1). Umso wichtiger ist die Vorgabe der Modellstruktur durch die SysML Profile aus dem zweiten Schritt des eigenen Ansatzes (vgl. Kapitel 4.2.2). Im Bereich der Visualisierung des Planungsergebnisses wird eine 3D-Simulation mit Visual Components entwickelt (Schäfer & Freund 2024). Diese nutzt Standardmodule **[D1]** und kinematisiert 3D-Objekte zur detailgetreuen Abbildung des Produktionssystems. Der resultierende Katalog erlaubt die Konfiguration des digitalen Modells basierend auf dem individuellen Planungsergebnis und zuvor definierten Parametern **[D3]**. Hierbei wird die Modulkompatibilität durch standardisierte Schnittstellen über die Unterprogramme der Handhabungsroboter und Puffer sichergestellt. So kann die Auswirkung einer Layoutänderung auf das Systemverhalten ad hoc analysiert werden. Eine Limitation dieses Ansatzes liegt im Trade-off zwischen maximaler Detailtreue und Benutzerfreundlichkeit d. h. minimaler Laufzeit bei der Durchführung von Simulationsexperimenten. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Nutzung der 3D-Software für bspw. Materialflusssimulationen nur eingeschränkt (z. B. für einzelne Schichten) möglich ist. Bei stärkerer Abstrahierung nehmen die Vorteile der 3D-Simulation gegenüber der 2D-Simulation deutlich ab. Für eine automatisierte Visualisierung der algorithmisch generierten Linie eignet sich der Ansatz allerdings bereits, um die Akzeptanz der Lösung beim Anwender zu fördern.

6.2 Ausblick

Die vorausgehende Diskussion zeigt, dass die Anforderungen zu einem sehr großen Teil durch den entwickelten Ansatz zur assistierten Produktionssystemplanung erfüllt werden. Nichtsdestotrotz erfordern die dargestellten Limitationen der Arbeit eine Elaboration möglicher Erweiterungspotentiale und zukünftiger Forschungsbedarfe.

Die vorliegende Arbeit lässt sich dem verhältnismäßig jungen Forschungsfeld der assistierten Produktionssystemplanung zuordnen. Dementsprechend ist die Menge **allgemeiner, weiterführender Forschungsbedarfe** groß. Der präsentierte Ansatz berücksichtigt die üblicherweise zum Zeitpunkt der Grobplanung vorliegenden Informationen als Inputfaktoren. Mit dem Ziel Produktionssysteme noch früher noch exakter zu optimieren, ergibt sich jedoch ein erhöhter Informationsbedarf. Dies ist auch für den Unterscheidung zwischen Ideal- und Realplanung zu beobachten. Weiterführende Forschung kann so bspw. Zugänglichkeitssimulationen oder Roboterbahnplanungen in die frühe Phase der Produktionssystemplanung integrieren, was zu einem erweiterten Optimierungsmodell führen würde. Eine Erweiterung des Optimierungsmodells kann ebenso durch die Variation der Fertigungstiefe erfolgen. Aktuell liegt der Fokus auf dem variantenspezifischen ALB. Die Integration der zugehörigen Teilefertigung sowie etwaiger *Make-or-Buy* Entscheidungen führen zu einer globalen Optimierung des Produktionssystems. Weiter werden Verfügbarkeiten und Parameterzusammenhänge bisher lediglich statisch und basierend auf Erfahrungswerten abgeschätzt. Die Kombination von Optimierung und Materialflusssimulation kann helfen, um ein dynamisches Systemverhalten und verschiedene Nachfrageszenarien in das Line Balancing einzubeziehen. So wären auch eine integrierte Dimensionierung von bspw. Pufferkapazitäten und -positionen möglich. Die allgemeine Ausweitung der algorithmischen Planungsassistenz auf den gesamten Planungszyklus stellt einen sehr umfassenden Forschungsbedarf dar. Die Grundidee wird im vierten Schritt des eigenen Ansatzes durch die Integration des digitalen (Simulations-) Modells in nachfolgende Planungsaufgaben bereits thematisiert. Die Berücksichtigung von Produktänderungen jedoch könnte eine zentrale Erweiterung in Richtung der Produktentwicklung sein. Die vorliegende Arbeit betrachtet ausschließlich produktionsseitige Freiheitsgrade während das Produktdesign fixiert ist. Im Sinne eines integrierten *Produkt-Produktions-CoDesign* (PPCD) nach Albers & Lanza et al. (2022) könnten basierend auf dem algorithmisch generierten Planungsergebnis produktseitige Freiheitsgrade (vgl. Abbildung 5.2) zusätzlich leicht variiert werden, um zu prüfen, ob damit eine hinsichtlich der definierten Zielkriterien noch bessere Linienkonfiguration gefunden werden kann (May & Schäfer et al. 2023). Im Anwendungskontext der vorliegenden Arbeit wäre das Ergebnis dieser Optimierung beidseitiger Freiheitsgrade eine Rückmeldung über mögliche, vorteilhafte Produktanpassungen an den Kunden. Zur Steigerung der Vorschlagsgüte in solchen Optimierungsschleifen schlägt Schäfer

& Krahe (2022) die sukzessive Integration von menschlichem Feedback vor. Zuletzt bietet das gesamte Forschungsfeld des digitalen Zwillings großes Potential für die reale Brownfield Produktionssystemplanung von *built to print* Produkten. Die Transparenz über Betriebsdaten bestehender Anlagen kann sowohl die Effizienz der Planung als auch die Qualität des Planungsergebnisses erheblich steigern. Für Zulieferer und Anlagenbauer eröffnet sich hier zudem ein komplett neues Forschungsfeld der Gestaltung neuer, digitaler Geschäftsmodelle, wie es in A_Merz (2022) mit einem *Business Model Canvas* für PPCD gezeigt wird.

Verglichen mit den identifizierten Forschungsbedarfen ist diese wissenschaftlichen Arbeit vielmehr als erster Schritt zu verstehen. Sie stellt jedoch eine fundamentale Grundlage für die Forschung im Bereich assistierter Produktionsplanung dar. Konkrete, potentielle **Erweiterungen** des vorgestellten Ansatzes ergeben sich entlang der vier Planungsschritte:

(1) Um die Methode zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten noch robuster gegenüber verschiedenen Bauteilcharakteristiken zu machen, können weitere Lösungsansätze ergänzt werden. Zudem ist eine konstante Erweiterung um neue Bauteile sinnvoll. Im Anwendungsbeispiel der Verbundlenkerachsen wird das bspw. auch durch den steigenden Absatz alternativer Antriebe und damit verbundener Achskonzepte motiviert.

(2) Zur Reduktion des manuellen Aufwands kann die datengetriebene Identifikation von Planungsregeln als PPR-Wechselwirkungen allgemein ausgeweitet und um eine möglichst automatisierte Modellierung der gefundenen Zusammenhänge (z. B. als SysML-Profile) erweitert werden. Forschungsbedarf besteht weiter in der Ergänzung der Modelle um neue Technologien und das Vorschlagen alternativer Prozessvorranggraphen.

(3) Die kontinuierliche Weiterentwicklung des ALB Modells ist von hoher Relevanz für einen erfolgreichen Transfer in die industrielle Anwendung. Bedarf ergibt sich vorrangig da, wo die vorliegende Arbeit vereinfachende Annahmen trifft. Zudem kann der Detailgrad wie bspw. eine genauere Berücksichtigung unproduktiver Zeiten durch die exakte, geometrische Lage eines Bauteils oder Features für die Planzeitbestimmung weiter gesteigert werden. Vor dem Hintergrund der in Zukunft für Zulieferer verpflichtenden *Life Cycle Assessments* (LCA) ist eine Erweiterung der multikriteriellen Zielfunktion um die Energieeffizienz als einen zentralen Aspekt der nachhaltigen Produktion (vgl. Thiede 2012) wie in A_Schukraft (2024) denkbar. Ebenso kann untersucht werden, ob eine a posteriori Verbesserung der gefundenen Lösungen zur Pareto-Optimalität möglich ist oder deren Pareto-Effizienz bewiesen werden kann. Für eine ausgewogene Berücksichtigung mehrerer Ziele kann das Goal Programming untersucht werden (Nickel & Rebennack et al. 2022).

(4) Eine Erweiterung der vorgestellten Methode um Aufgaben der Detailplanung ist vielseitig möglich. Als Beispiel scheint die Assistenz des Menschen bei der Layoutplanung aufgrund der hohen Anzahl an Freiheitsgraden besonders sinnvoll. Wie in A_Schulze (2023) elaboriert, eignet sich hierfür auch *Reinforcement Learning* (RL). Dabei wird das Layout über den Trai-

ningsverlauf so lange rekonfiguriert, bis eine optimale Lösung konvergiert. Zudem kann die Simulation um Umweltaspekte ergänzt werden (vgl. Thiede & Seow et al. 2013), um bspw. eine datenbasierte Vorhersage des Energiebedarfs (siehe Flick & Vruna et al. 2023) und eine direkte Reduktion der Scope 1 Emissionen der Linie (vgl. Ranganathan & Corbier et al. 2004) zu befähigen.

Die Ergebnisse aus Kapitel 5 zeigen die allgemeine, industrielle Anwendbarkeit der Methode. Damit besitzen die vorliegende Forschungsarbeit und die dargelegten Erweiterungen hohes Potential zur Effizienzsteigerung in der industriellen Produktionssystemplanung.

Da die Entwicklung und Einführung neuer, digitaler Methoden in der Industrie ein komplexes Unterfangen darstellen, wird im Folgenden kurz auf **konkrete Handlungsempfehlungen für eine industrielle Einführung** eingegangen.

Zunächst ist es unumgänglich für ein Unternehmen, die für die assistierte Produktionssystemplanung notwendigen Inputdaten bereitzustellen. Dabei muss das Unternehmen prozessual sicherzustellen, dass diese Informationen in digitaler Form zum Zeitpunkt der Grobplanung in ausreichender Datenqualität zur Verfügung stehen. Die im Rahmen des vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung* (BMBF) öffentlich geförderten Verbundprojekts *Menschorientierte Gestaltung komplexer System of Systems* (MoSyS) durchgeführten Experteninterviews (vgl. Tihlarik 2024) zeigen, dass die Akzeptanz der Anwender bzw. Planer eine große Hürde bei der Industrialisierung darstellt. Obwohl die vorliegende Forschungsarbeit eine computergestützte Assistenz des Menschen bei repetitiven Aufgaben und keinen Ersatz des menschlichen Planungsvermögens verfolgt, lässt sich allgemeines Misstrauen gegenüber algorithmisch konzipierten Lösungen beobachten. Aus diesem Grund wird Unternehmen empfohlen, die Berechnungslogik des Ansatzes transparent darzulegen und so zur Nachvollziehbarkeit der Lösung beizutragen. Weiter wird empfohlen, dass der Planer Einfluss auf die Berechnungslogik nehmen kann. Darüber hinaus sollten Unternehmen eine intuitive Bedienerschnittstelle (engl. *User Interface*) zur Verfügung stellen, um den Anwender durch die teils komplexe algorithmische Planung zu führen. Aus technischer Sicht ist dabei die Integration des Ansatzes in die bestehende Systemlandschaft zu betonen. Die Planungsassistenz sollte kein weiteres Softwaretool in einer bereits äußerst heterogenen Tool-Landschaft sein, sondern in die bestehenden Abläufe, Methoden und Werkzeuge integriert werden. Um die damit verbundene Multidisziplinarität des Planungsprozesses beherrschbar zu machen, wird die Verwendung von fachdisziplinübergreifenden PPR-Informationsmodellen als *single source of truth* empfohlen. Die dafür notwendige Sprache muss in einer Ontologie dokumentiert und an die Unternehmenssprache angepasst werden.

7 Zusammenfassung

Produzierende Unternehmen in der Automobil- und Automobilzuliefererindustrie sehen sich konfrontiert mit hochfrequenten und immer kürzeren Entwicklungs- und Planungszyklen. Durch einen wachsenden Absatz immer komplexerer Gesamtsysteme, eine stetig zunehmende Variantenvielfalt und einen steigenden Kostendruck ausgehend von der chinesischen Automobilindustrie ergibt sich der Bedarf, die Effizienz bei der wiederkehrenden Planung von Produktionssystemen zur Herstellung kundenspezifischer Produktvarianten zu maximieren. Dem gegenüber steht die aktuell vorliegende Ausgangssituation der industriellen Planung, die stark von manuellen Prozessen und personengebundenem Wissen geprägt ist.

Dieser Problemstellung begegnet die vorliegende Arbeit mit dem Ziel der Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes zur assistierten, modellbasierten Grobplanung von Produktionssystemen. Im Allgemeinen betrachtet das Forschungsfeld der assistierten Produktionssystemplanung den Einsatz digitaler Methoden und Werkzeuge zur rechnergestützten Unterstützung des Menschen bei der Produktionssystemplanung. Der aktuelle Stand der Forschung im Bereich der assistierten Produktionssystemplanung weist hierbei jedoch ein signifikantes Defizit auf: Die in der Literatur vorliegenden Ansätze sind meist spezifisch auf die Assistenz bei einzelnen Aufgaben der Grobplanung ausgerichtet. Ein ganzheitlicher Ansatz zur Kombination von Produktanalyse, betriebsmittelunabhängiger Ableitung des Prozessvorranggraphen und anschließender, betriebsmittelbezogener Optimierung der Produktionsfolge inkl. deren Visualisierung und Simulation bleibt aus.

Die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelte Methode vereint diese vier Teildisziplinen besonders innovativ in einem ganzheitlichen Ansatz und leistet damit einen wissenschaftlichen Mehrwert im Bereich der assistierten Produktionssystemplanung. Zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten kombiniert die Methode mehrere Lösungsansätze und gibt deren Eignung abhängig von einer Charakterisierung der vorliegenden Datenbasis an. Die identifizierten, zu erstellenden Produktmerkmale werden anhand von SysML-Profilen in einem ganzheitlichen PPR-Modell in Zusammenhang mit korrespondierenden Produktionsprozessen und Eigenschaften des Produktionssystems gebracht. Dieser Ansatz erlaubt eine modellbasierte Abbildung von Planungsregeln und Erfahrungswissen als PPR-Wechselwirkungen und damit deren Berücksichtigung bei der Ableitung des betriebsmittelunabhängigen Prozessvorranggraphen. Darauf aufbauend wird die betriebsmittelbezogene Optimierung der Zuordnung von Prozessschritten (i. A. Aufgaben) zu Stationen betrachtet. Das hierfür neu entwickelte *Assembly Line Balancing* (ALB) Modell ist besonders innovativ und bildet das real vorliegende Problem hinreichend genau ab. Neben komplexen Eigenschaften wie bspw. der Auswahl des Stationsequipments und mehreren Robotern je Station wird erstmals die Teilbarkeit von

Aufgaben betrachtet, wie sie für das Fügen durch Schweißen erforderlich ist. Das komplexe Problem wird mit dem Default-Solver Gurobi unter Berücksichtigung mehrerer Zielkriterien (Kosten, Flächenbedarf, Taktzeitreserve und Toleranzabweichungen) in akzeptabler Rechenzeit exakt gelöst. Das resultierende Planungsergebnis wird schließlich als modulares, digitales (Simulations-) Modell dreidimensional visualisiert und so in einen ganzheitlichen, digitalen Planungsprozess eingebunden.

Die Ergebnisse der Anwendung und Validierung am Beispiel der Grobplanung von Produktionslinien zur Herstellung kundenspezifischer Verbundlenkerachsen bei einem Tier 1 Automobilzulieferer verdeutlichen die allgemeine, industrielle Anwendbarkeit der entwickelten Methode. Dabei werden verschiedene Methoden zur globalen und lokalen Ähnlichkeitsanalyse von realen Blechbauteilen miteinander verglichen und die Resultate hinsichtlich ihrer Genauigkeit erörtert. Anschließend wird das PPR-Modell des Anwendungsbeispiels manuell erstellt und auf mögliche Ansätze zur datengetriebenen Planzeitbestimmung eingegangen. Die multikriterielle Lösung des mathematischen ALB Modells ermöglicht letztlich eine Bewertung des Planungsergebnisses gegenüber der einkriteriellen Optimalwerte. Weiter vergleicht eine abschließende Validierung die algorithmisch generierten Lösungen mit einer exemplarischen, manuellen Expertenplanung. Der innovative Ansatz erzeugt eine Linienkonfiguration, die eine direkte Reduktion der Herstellungskosten, des Flächenbedarfs und der Toleranzabweichungen bei gleichzeitiger Maximierung der Taktzeitreserve gegenüber der manuellen Lösung aufweist. Das ermöglicht eine Steigerung der jährlichen Ausbringung von bis zu 9,5 %. Weiter können durch den neuartigen Planungsansatz indirekte Einsparungen der Personalkosten erzielt werden, indem der Zeitbedarf der betrachteten Planungsaufgabe um ca. 20 % reduziert wird.

Mit dem innovativen, ganzheitlichen Ansatz zur assistierten, modellbasierten Grobplanung von Produktionssystemen liefert die vorliegende Forschungsarbeit somit einen Beitrag zur Steigerung der Effizienz in einem zukunftsfähigen Planungsprozess.

Liste eigener Publikationen

- Albers, A.; Lanza, G.; Klippert, M.; Schäfer, L.; Frey, A.; Hellweg, F.; Müller-Welt, P.; Schöck, M.; Krahe, C.; Nowoseltschenko, K. & Rapp, S. (2022), „Product-Production-CoDesign: An Approach on Integrated Product and Production Engineering Across Generations and Life Cycles“, *Procedia CIRP* 109.3, S. 167–172. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.231.
- Albers, A.; Rapp, S.; Klippert, M.; Lanza, G. & Schäfer, L. (2022), „Produkt-Produktions-CoDesign: Ein Ansatz zur integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung über Generationen und Lebenszyklen hinweg“, *Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) News* 3.1.
- Gorny, P. M.; Renner, B. & Schäfer, L. (2023), „Prosocial behavior among human workers in robot-augmented production teams—A field-in-the-lab experiment“, *Frontiers in Behavioral Economics* 2. DOI: 10.3389/frbhe.2023.1220563.
- Höger, K.; Schäfer, L.; Schild, L. & Lanza, G. (2022), „Towards a User Support System for Computed Tomography Measurements Using Machine Learning“. *Production at the Leading Edge of Technology*. Hrsg. von B.-A. Behrens; A. Brosius; W.-G. Drossel; W. Hintze; S. Ihlenfeldt & P. Nyhuis. Bd. 63. Lecture Notes in Production Engineering. Cham: Springer International Publishing, S. 506–514. DOI: 10.1007/978-3-030-78424-9_56.
- Kandler, M.; Dierolf, L.; Bender, M.; Schäfer, L.; May, M. C. & Lanza, G. (2022), „Shopfloor Management Acceptance in Global Manufacturing“, *Procedia CIRP* 115, S. 190–195. DOI: 10.1016/j.procir.2022.10.072.
- Kandler, M.; Schäfer, L.; Gorny, P. M.; Ströhlein, K.; Lanza, G. & Nieken, P. (2021), „Learning Factory Labs as Field-in-the-Lab Environments - An Experimental Concept for Human-Centred Production Research“. *Proceedings of the 11th Conference on Learning Factories (CLF 2021), Graz, Austria*. SSRN Electronic Journal.
- Kuhnle, A.; May, M. C.; Schäfer, L. & Lanza, G. (2022), „Explainable reinforcement learning in production control of job shop manufacturing system“, *International Journal of Production Research* 60.19, S. 5812–5834. DOI: 10.1080/00207543.2021.1972179.
- Kuhnle, A.; Schäfer, L.; Stricker, N. & Lanza, G. (2019), „Design, Implementation and Evaluation of Reinforcement Learning for an Adaptive Order Dispatching in Job Shop Manufacturing Systems“, *Procedia CIRP* 81, S. 234–239. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.041.
- Loffredo, A.; May, M. C.; Schäfer, L.; Matta, A. & Lanza, G. (2023), „Reinforcement learning for energy-efficient control of parallel and identical machines“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 44, S. 91–103. DOI: 10.1016/j.cirpj.2023.05.007.
- Martin, A.; Schäfer, L.; Fründ, J.; Lützelschwab, J.; Fischer, M.; Lanza, G. & Albers, A. (2024a), „A Contribution to MBSE-supported Modeling in Product-Production-CoDesign“. *Proceedings of the 18th Annual IEEE International Systems Conference (SysCon), Montreal*,

- Canada. Institute of Electrical und Electronics Engineers (IEEE), S. 1–8. DOI: 10.1109/SysCon61195.2024.10553444.
- Martin, A.; Schäfer, L.; Fründ, J.; Schwarz, S. E.; Lanza, G. & Albers, A. (2024b), „A Model-Based Approach to Analyze Change Propagation and Impact in Product-Production-CoDesign“. *Proceedings of the 18th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME), Gulf of Naples, Italy*. Procedia CIRP.
- May, M. C.; Albers, A.; Fischer, M. D.; Mayerhofer, F.; Schäfer, L. & Lanza, G. (2021), „Queue Length Forecasting in Complex Manufacturing Job Shops“, *Forecasting* 3.2, S. 322–338. DOI: 10.3390/forecast3020021.
- May, M. C.; Hermeler, S.; Mauch, E.; Dvorak, J.; Schäfer, L. & Lanza, G. (2023), „Reinforcement Learning for Improvement Measure Selection in Learning Factories“. *Proceedings of the 13th Conference on Learning Factories (CLF 2023), Reutlingen, Germany*. DOI: 10.2139/ssrn.4470426.
- May, M. C.; Neidhöfer, J.; Körner, T.; Schäfer, L. & Lanza, G. (2022), „Applying Natural Language Processing in Manufacturing“, *Procedia CIRP* 115, S. 184–189. DOI: 10.1016/j.procir.2022.10.071.
- May, M. C.; Schäfer, L.; Frey, A.; Krahe, C. & Lanza, G. (2023), „Towards Product-Production-CoDesign for the Production of the Future“, *Procedia CIRP* 119, S. 944–949. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.172.
- Schäfer, L.; Burkhardt, L.; Kuhnle, A. & Lanza, G. (2021), „Integriertes Produkt-Produktions-Codesign“, *wt Werkstattstechnik online* 111.04, S. 201–205. DOI: 10.37544/1436-4980-2021-04-23.
- Schäfer, L.; Frank, A.; May, M. C. & Lanza, G. (2022), „Automated Derivation of Optimal Production Sequences from Product Data“, *Procedia CIRP* 107.04, S. 469–474. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.010.
- Schäfer, L. & Fründ, J. (2024), „BENTELER Rolls Out the Production Technology of Tomorrow With the Help of Visual Components“, *Visual Components Case Study*. URL: https://www.visualcomponents.com/resources/case_studies/benteler-case-study-developing-the-production-technology-of-tomorrow/ (besucht am 01. 10. 2024).
- Schäfer, L.; Günther, M.; Martin, A.; Lüpfer, M.; Mandel, C.; Rapp, S.; Lanza, G.; Anacker, H.; Albers, A. & Köchling, D. (2023), „Systematics for an Integrative Modelling of Product and Production System“, *Procedia CIRP* 118.04, S. 104–109. DOI: 10.1016/j.procir.2023.06.019.
- Schäfer, L.; Klenk, F.; Maier, T.; Zehner, M.; Peukert, S.; Linzbach, R.; Treiber, T. & Lanza, G. (2024), „A systematic approach for simulation-based dimensioning of production systems during the concept phase of factory planning“, *Production Engineering* 21.3, S. 215. DOI: 10.1007/s11740-024-01273-3.

- Schäfer, L.; Kochendörfer, P.; May, M. C. & Lanza, G. (2023), „Planning and Multi-Objective Optimization of Production Systems by means of Assembly Line Balancing“, *Procedia CIRP* 120.3, S. 1125–1130. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.136.
- Schäfer, L. & Krahe, C. (2022), „KI-Assistenzsysteme in der Produktentwicklung“. *Potentiale digitaler Führung und Technologien für die Teaminteraktion von morgen*. Hrsg. von G. Lanza; P. Nieken; P. Nyhuis & A. Trübswetter. Karlsruhe: TEWISS Verl., S. 68–74.
- Schäfer, L.; Reichardt, A.-K. & Lanza, G. (2022), „Lösungsmuster zur Produktionssystemplanung“, *wt Werkstattstechnik online* 112.04, S. 243–247. DOI: 10.37544/1436-4980-2022-04-43.
- Schäfer, L.; Ströhlein, K.; Kandler, M.; Hulla, M.; Ast, J.; Lanza, G.; Nieken, P.; Ramsauer, C. & Nyhuis, P. (2022), „New Competences in a Digitalized Shopfloor – A Modular Training Concept for Learning Factories“. *Proceedings of the 12th Conference on Learning Factories (CLF 2022), Singapore*. DOI: 10.2139/ssrn.4071822.
- Schäfer, L.; Treml, N.; May, M. C. & Lanza, G. (2023), „Classifying Parts using Feature Extraction and Similarity Assessment“, *Procedia CIRP* 119, S. 822–827. DOI: 10.1016/j.procir.2023.03.127.
- Schäfer, L.; Tse, S.; May, M. C. & Lanza, G. (2024), „Multi-Objective Mathematical Optimization in Assisted Production Planning“. *Proceedings of the 31st EurOMA Conference, Transforming People and Processes for a better World, Barcelona, Spain*. Hrsg. von C. Gimenez; C. Sancha; C. Roig & G. Gomez. European Operations Management Association. DOI: 10.5445/IR/1000172572.
- Schäfer, L.; Tse, S.; May, M. C. & Lanza, G. (2025), „Assisted Production System Planning by means of Complex Robotic Assembly Line Balancing“, *Journal of Manufacturing Systems* 78.3, S. 109–123. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.11.008.
- Steier, G.; Schäfer, L.; Moser, S.; Kandler, M. & Lanza, G. (2022), „Digitale Transformation in global produzierenden Unternehmen“, *wt Werkstattstechnik online* 112.05, S. 314–319. DOI: 10.37544/1436-4980-2022-05-44.
- Ströhlein, K.; Gorny, P. M.; Kandler, M.; Schäfer, L.; Nieken, P. & Lanza, G. (2022), „Decision Experiments in the Learning Factory: A Proof of Concept“. *Proceedings of the 12th Conference on Learning Factories (CLF 2022), Singapore*. SSRN Electronic Journal. DOI: 10.2139/ssrn.4072356.

Literaturverzeichnis

Verweise gemäß dem Schema (A_Name Jahr) beziehen sich auf studentische Arbeiten, die vom Verfasser der Dissertation angeleitet wurden.

A_Beck 2022

Beck, C. (2022), „Entwicklung einer Methode zur Konzeption eines Digitalen Zwillings eines modularen Produktionssystems“. Bachelorthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Gese 2024

Gese, S. (2024), „Datengetriebenes Vorgehen zur Ermittlung von Planzeiten in der Einzelproduktion“. Masterthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Jung 2023

Jung, D. (2023), „Entwicklung eines Modulbaukastens für die Planung von Produktionssystemen und dessen simulationsgestützte Validierung“. Masterthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Merz 2022

Merz, K. (2022), „Produkt-Produktions-CoDesign: Gestaltungsprinzipien für Geschäftsmodelle“. Masterthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Ortiz Lizarraga 2024

Ortiz Lizarraga, G. (2024), „Partial Shape Retrieval of Sheet Metal Body Parts“. Masterthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Pflugfelder 2021

Pflugfelder, M. (2021), „Automatisierte Ableitung der produktseitigen Anforderungen an die Produktion durch Implementierung der ISO 10303 in der digitalen Konstruktion“. Bachelorthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Reichardt 2021

Reichardt, A.-K. (2021), „Entwicklungssystematik eines Lösungsmusterbasierten Rahmenmodells zur integrierten Produktionssystemplanung“. Masterthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Schenkel 2023

Schenkel, L. (2023), „Modellbasierte Verknüpfung von Produkt und Produktionssystem basierend auf dem Prinzip der integrierten Produktionsplanung“. Masterthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Schneider 2023

Schneider, T. (2023), „Mathematische Optimierung in der Fertigungsplanung: Entwicklung und Implementierung eines multikriteriellen Assembly Line Balancing Modells bei nicht-diskreter Zuordnung von Montageschritten zu Stationen“. Masterthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Schukraft 2024

Schukraft, D. (2024), „Multikriterielle Optimierung von Produktionssystemen mittels Assembly Line Balancing“. Masterthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Schulze 2023

Schulze, L. (2023), „Einsatz von Machine Learning Methoden in der Fabriklayoutplanung – Eine Analyse und Bewertung“. Bachelorthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Tse 2023

Tse, S. Y. C. (2023), „Multikriterielle Optimierung in der Produktionsplanung durch Modellierung und Implementierung von mathematischen Methoden des Operation Researchs“. Bachelorthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Zehner 2022

Zehner, M. (2022), „Simulationsbasierte Skalierung von Produktionssystemen in der Konzeptphase des Fabrikplanungsprozesses“. Masterthesis. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

Abdous & Delorme et al. 2022

Abdous, M.-A.; Delorme, X.; Battini, D. & Berger-Douce, S. (2022), „Multi-objective collaborative assembly line design problem with the optimisation of ergonomics and economics“, *International Journal of Production Research*, S. 1–16. DOI: 10.1080/00207543.2022.2153185.

Achlioptas & Diamanti et al. 2017

Achlioptas, P.; Diamanti, O.; Mitliagkas, I. & Guibas, L. (2017), „Learning Representations and Generative Models for 3D Point Clouds“, *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning (ICML), Stockholm, Sweden*. arXiv: 1707.02392.

Ahmed & Saint et al. 2018

Ahmed, E.; Saint, A.; Shabayek, A. E. R.; Cherenkova, K.; Das, R.; Gusev, G.; Aouada, D. & Ottersten, B. E. (2018), „Deep Learning Advances on Different 3D Data Representations: A Survey“, *Computing Research Repository (CoRR)*. arXiv: 1808.01462.

Aigner 2015

Aigner, M. (2015), *Graphentheorie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-10323-1.

Albers 2023

Albers, A., Hrsg. (2023), *Engineering neu denken und gestalten. Herausforderungen, Anwendungsszenarien und das neue Leitbild Advanced Systems Engineering*. acatech IMPULS. München: acatech — Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. DOI: 10.48669/aca_2023-7.

Albers & Deigendesch et al. 2009

Albers, A.; Deigendesch, T. & Turki, T. (2009), „Design Patterns in Microtechnology“. *Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 5, Design Methods and Tools (pt. 1), Palo Alto, CA, USA*. Hrsg. von M. Norell Bergendahl; M. Grimheden; L. Leifer; P. Skogstad & U. Lindemann. ICED, S. 385–396.

Albers & Lanza et al. 2022

Albers, A.; Lanza, G.; Klippert, M.; Schäfer, L.; Frey, A.; Hellweg, F.; Müller-Welt, P.; Schöck, M.; Krahe, C.; Nowoseltschenko, K. & Rapp, S. (2022), „Product-Production-CoDesign: An Approach on Integrated Product and Production Engineering Across Generations and Life Cycles“, *Procedia CIRP* 109.3, S. 167–172. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.231.

Albus & Seeber 2021

Albus, M. & Seeber, C. (2021), „Linear optimization for dynamic selection of resources in constrained assembly line balancing problems“, *Procedia CIRP* 104.1, S. 134–139. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.023.

Alt 2012

Alt, O. (2012), *Modellbasierte Systementwicklung mit SysML*. München: Carl Hanser Fachbuchverlag. DOI: 10.3139/9783446431270.

Amen 2006

Amen, M. (2006), „Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds“, *European Journal of Operational Research* 168.3, S. 747–770. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.07.026.

Anacker 2015

Anacker, H. (2015), *Instrumentarium für einen lösungsmusterbasierten Entwurf fortgeschrittener mechatronischer Systeme*. Dissertation. Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts. Paderborn.

Arvanitidis & Hansen et al. 2018

Arvanitidis, G.; Hansen, L. K. & Soren, H. (2018), „Latent Space Oddity: on the Curvature of Deep Generative Models“, *Conference on Learning Representations (ICLR), Vancouver, Canada*. arXiv: 1710.11379.

Bach & Langner et al. 2017

Bach, J.; Langner, J.; Otten, S.; Holzapfel, M. & Sax, E. (2017), „Data-driven development, a complementing approach for automotive systems engineering“, *Proceedings of the 2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE), Vienna, Austria*, S. 1–6. DOI: 10.1109/SysEng.2017.8088295.

Bai & Gao et al. 2010

Bai, J.; Gao, S.; Tang, W.; Liu, Y. & Guo, S. (2010), „Design reuse oriented partial retrieval of CAD models“, *Computer-Aided Design* 42.12, S. 1069–1084. DOI: 10.1016/j.cad.2010.07.002.

Battaïa & Dolgui 2013

Battaïa, O. & Dolgui, A. (2013), „A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches“, *International Journal of Production Economics* 142.2, S. 259–277. DOI: 10.1016/j.ijpe.2012.10.020.

Bauer 2014

Bauer, F. (2014), *Planungswerkzeug zur wissensbasierten Produktionssystemkonzipierung*. Dissertation. Paderborn: Universität Paderborn.

Bihler 1999

Bihler, M. (1999), „Feature-Modelling – Design by Feature“. *Dagstuhl Seminar 1997*. Hrsg. von H. Hagen. Vieweg+Teubner Verlag.

Bischoff & Warnecke et al. 1999

Bischoff, J.; Warnecke, H. J.; Westkämper, E. & Bullinger, H.-J. (1999), *Ein Verfahren zur zielorientierten Auftragseinplanung für teilautonome Leistungseinheiten*. Bd. 292. IPA-IAO - Forschung und Praxis. Berlin: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-47980-9.

Bossmann 2007

Bossmann, M. (2007), *Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung*. Dissertation. Schriftenreihe Produktionstechnik. Saarbrücken: Universität des Saarlandes.

Boysen 2005

Boysen, N. (2005), *Variantenfließfertigung* 5. Dissertation. Bd. 49. Betriebswirtschaftliche Forschung zur Unternehmensführung, Universität Hamburg, FB Wirtschaftswissenschaften. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.

Boysen & Fliedner et al. 2007

Boysen, N.; Fliedner, M. & Scholl, A. (2007), „A classification of assembly line balancing problems“, *European Journal of Operational Research* 183.2, S. 674–693. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.10.010.

Boysen & Schulze et al. 2022

Boysen, N.; Schulze, P. & Scholl, A. (2022), „Assembly line balancing: What happened

- in the last fifteen years?“, *European Journal of Operational Research* 301.3, S. 797–814. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.11.043.
- Bracht & Geckler et al. 2011
- Bracht, U.; Geckler, D. & Wenzel, S. (2011), *Digitale Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-88973-1.
- Brüggemann & Bremer 2015
- Brüggemann, H. & Bremer, P. (2015), „Problemlösungsmethoden und elementare Qualitätstools“. *Grundlagen Qualitätsmanagement*. Hrsg. von H. Brüggemann & P. Bremer. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 15–28. DOI: 10.1007/978-3-658-09221-4_2.
- Bullinger & Richter et al. 2003
- Bullinger, H.-J.; Richter, M.; Nohe, P. & Kröll, M. (2003), „An approach to handling risk aspects by means of technology assessment“, *Concurrent Engineering, Proceedings of the 10th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, Madeira, Portugal*.
- Bullinger 1986
- Bullinger, H.-J., Hrsg. (1986), *Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis*. München und Wien: Hanser.
- Burachik & Kaya et al. 2022
- Burachik, R. S.; Kaya, C. Y. & Rizvi, M. M. (2022), „Algorithms for generating Pareto fronts of multi-objective integer and mixed-integer programming problems“, *Engineering Optimization* 54.8, S. 1413–1425. DOI: 10.1080/0305215X.2021.1939695.
- Burr 2008
- Burr, H. (2008), *Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung im Karosserierohrbau*. Dissertation. Universität des Saarlandes. DOI: 10.22028/D291-22495.
- Bursac 2016
- Bursac, N. (2016), *Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung*. Dissertation. IPEK Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe. DOI: 10.5445/IR/1000054484.
- Cadet & Sinnwell et al. 2017
- Cadet, M.; Sinnwell, C.; Fischer, J. & Stephan, N. (2017), „Kernelemente für die Zusammenarbeit von CTP-Entwicklung und CTPS-Planung“. *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme*. Hrsg. von M. Eigner; W. Koch & C. Muggeo. Berlin: Springer Vieweg, S. 93–101. DOI: 10.1007/978-3-662-55124-0_11.
- Chang & Funkhouser et al. 2015
- Chang, A. X.; Funkhouser, T.; Guibas, L.; Hanrahan, P.; Huang, Q.; Li, Z.; Savarese, S.;

- Savva, M.; Song, S.; Su, H.; Xiao, J.; Yi, L. & Yu, F. (2015), „ShapeNet: An Information-Rich 3D Model Repository“, *Computing Research Repository (CoRR)*. arXiv: 1512.03012.
- Chen & Cheng et al. 2018
- Chen, Y.-Y.; Cheng, C.-Y. & Li, J.-Y. (2018), „Resource-constrained assembly line balancing problems with multi-manned workstations“, *Journal of Manufacturing Systems* 48, S. 107–119. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.07.001.
- Chi & Qiao et al. 2022
- Chi, Y.; Qiao, Z.; Li, Y.; Li, M. & Zou, Y. (2022), „Type-1 Robotic Assembly Line Balancing Problem That Considers Energy Consumption and Cross-Station Design“, *Systems* 10.6, S. 218. DOI: 10.3390/systems10060218.
- Chutima 2022
- Chutima, P. (2022), „A comprehensive review of robotic assembly line balancing problem“, *Journal of Intelligent Manufacturing* 33.1, S. 1–34. DOI: 10.1007/s10845-020-01641-7.
- Dangelmaier 2003
- Dangelmaier, W. (2003), *Produktion und Information*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-55584-8.
- Dangelmaier 2009
- Dangelmaier, W. (2009), *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung: Im Sommer keine Kirschpralinen?* VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-00633-3.
- Deb & Pratap et al. 2002
- Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S. & Meyarivan, T. (2002), „A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II“, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6.2, S. 182–197. DOI: 10.1109/4235.996017.
- Deigendesch 2009
- Deigendesch, T. (2009), *Kreativität in der Produktentwicklung und Muster als methodisches Hilfsmittel*. Dissertation. IPEK Institut für Produktentwicklung, Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe.
- Delligatti 2014
- Delligatti, L. (2014), *SysML distilled: A brief guide to the systems modeling language*. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley.
- Deloitte 2016
- Deloitte (2016), „Komplexitätsmanagement in der Automobilindustrie“. *Deloitte Operations Complexity Management*. Hrsg. von H. Proff; S. Ullerich; T. Pottebaum & C. Bitterich. Berlin: Deloitte Touche GmbH.
- DIN 8580 2003
- DIN 8580 (2003), *DIN 8580 Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Beuth.

DIN EN 60848 2014

DIN EN 60848 (2014), *DIN EN 60848 GRAFCET, Spezifikationssprache für Funktionspläne der Ablaufsteuerung (IEC 60848:2013)*. Berlin: DIN Media GmbH.

Domschke & Drexl et al. 2015

Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R. & Scholl, A. (2015), *Einführung in Operations Research*. 9. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Ehrlenspiel 2014

Ehrlenspiel, K. (2014), *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 7. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. DOI: 10.1007/978-3-642-41959-1.

Eigner & Koch et al. 2017

Eigner, M.; Koch, W. & Muggeo, C., Hrsg. (2017), *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme: Der PLM-unterstützte Referenzentwicklungsprozess für Produkte und Produktionssysteme*. Berlin: Springer Vieweg.

Eilers 2015

Eilers, J. (2015), *Methodik zur Planung skalierbarer und rekonfigurierbarer Montagesysteme*. Dissertation. Bd. 2015.9. Produktionssystematik, Technische Hochschule Aachen, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT. Aachen: Apprimus-Verl.

Eversheim 2002

Eversheim, W. (2002), *Organisation in der Produktionstechnik 3*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-56336-2.

Eversheim & Schuh 1999

Eversheim, W. & Schuh, G. (1999), *Produktion und Management 3*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-58399-5.

Fahrmeir & Heumann et al. 2016

Fahrmeir, L.; Heumann, C.; Künstler, R.; Pigeot, I. & Tutz, G. (2016), *Statistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-50372-0.

Fallböhmer 2000

Fallböhmer, M. (2000), *Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung*. Dissertation. Bd. 23/2000. Berichte aus der Produktionstechnik, Techn. Hochsch. Aachen. Aachen: Shaker.

Famarzi & Heidarinejad et al. 2020

Famarzi, A.; Heidarinejad, M.; Stephens, B. & Mirjalili, S. (2020), „Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm“, *Knowledge-Based Systems* 191, S. 105–190. DOI: 10.1016/j.knsys.2019.105190.

Fattahi & Roshani et al. 2011

Fattahi, P.; Roshani, A. & Roshani, A. (2011), „A mathematical model and ant colony

algorithm for multi-manned assembly line balancing problem“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 53.1-4, S. 363–378. DOI: 10.1007/s00170-010-2832-y.

Fayyad & Piatetsky-Shapiro et al. 1996

Fayyad, U.; Piatetsky-Shapiro, G. & Smyth, P. (1996), „Knowledge discovery and data mining: towards a unifying framework“, *Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Portland, Oregon 2*, S. 82–88.

Feldhusen & Nagarajah et al. 2010

Feldhusen, J.; Nagarajah, A. & Schubert, S. (2010), „A Data Mining Method for selecting the suitable existing Product Variant as a Development Base for a new Order“. *Design Conference 2010*. Zagreb, Croatia, S. 895–904.

Feldmann & Schmuck et al. 2008

Feldmann, K.; Schmuck, T.; Brossog, M. & Dreyer, J. (2008), „Beschreibungsmodell zur Planung von Produktionssystemen – Entwicklung eines Beschreibungsmodells für Produkte, Prozesse und Ressourcen zur rechnergestützten Planung produktionstechnischer Systeme“, *wt Werkstattstechnik online* 98.3, S. 156–162.

Feldmann 2014

Feldmann, K., Hrsg. (2014), *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. 1. Aufl. Handbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser.

Fleischer 2019

Fleischer, B. (2019), *Methodisches Konstruieren in Ausbildung und Beruf: Praxisorientierte Konstruktionsentwicklung und rechnergestützte Optimierung*. Springer eBooks Computer Science and Engineering. Wiesbaden: Springer Vieweg. DOI: 10.1007/978-3-658-27690-4.

Flick & Vruna et al. 2023

Flick, D.; Vruna, M.; Bartos, M.; Ji, L.; Herrmann, C. & Thiede, S. (2023), „Machine learning based internal and external energy assessment of automotive factories“, *CIRP Annals* 72.1, S. 21–24. DOI: 10.1016/j.cirp.2023.04.038.

Fortin & Rainville et al. 2012

Fortin, F.-a.; Rainville, F.-M. de; Gardner, M.-A.; Parizeau, M. & Gagne, C. (2012), „DEAP: evolutionary algorithms made easy: The Journal of Machine Learning Research“, *The Journal of Machine Learning Research* 13, S. 2171–2175.

Friedenthal & Moore et al. 2015

Friedenthal, S.; Moore, A. & Steiner, R. (2015), *A Practical Guide to SysML*. Elsevier. DOI: 10.1016/C2013-0-14457-1.

Gausemeier & Brandis et al. 2012

Gausemeier, J.; Brandis, R.; Dorociak, R.; Müller, A.; Nyßen, A. & Terfloth, A. (2012),

„Integrative Konzipierung von Produkt und Produktionssystem“. *Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren. Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung*. Hrsg. von J. Gausemeier; G. Lanza & U. Lindemann. Hanser.

Gausemeier & Lanza et al. 2012

Gausemeier, J.; Lanza, G. & Lindemann, U., Hrsg. (2012), *Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren. Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung*. Hanser.

Gezawa & Zhang et al. 2020

Gezawa, A. S.; Zhang, Y.; Wang, Q. & Yunqi, L. (2020), „A Review on Deep Learning Approaches for 3D Data Representations in Retrieval and Classifications“, *IEEE Access* 8, S. 57566–57593. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2982196.

Ghosh & Gagnon 1989

Ghosh, S. & Gagnon, R. J. (1989), „A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems“, *International Journal of Production Research* 27.4, S. 637–670. DOI: 10.1080/00207548908942574.

Gomeringer & Kilgus et al. 2022

Gomeringer, R.; Kilgus, R.; Menges, V.; Oesterle, S.; Rapp, T.; Scholer, C.; Stenzel, A.; Stephan, A. & Wieneke, F. (2022), *Tabellenbuch Metall: Mit Formelsammlung*. 49., neu bearbeitete und erweiterte Aufl. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer GmbH & Co. KG.

Gönnheimer & Kimmig et al. 2019

Gönnheimer, P.; Kimmig, A.; Mandel, C.; Stürmlinger, T.; Yang, S.; Schade, F.; Ehrmann, C.; Klee, B.; Behrendt, M.; Schlechtendahl, J.; Fischer, M.; Trautmann, K.; Fleischer, J.; Lanza, G.; Ovtcharova, J.; Becker, J. & Albers, A. (2019), „Methodical approach for the development of a platform for the configuration and operation of turnkey production systems“, *Procedia CIRP* 84.11, S. 880–885. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.260.

Goodfellow & Bengio et al. 2016

Goodfellow, I.; Bengio, Y. & Courville, A. (2016), *Deep learning*. Cambridge, Massachusetts und London, England: MIT Press.

Göpfert 1998

Göpfert, J. (1998), *Modulare Produktentwicklung*. Dissertation. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. DOI: 10.1007/978-3-663-08152-4.

Grieves & Vickers 2017

Grieves, M. & Vickers, J. (2017), „Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems“. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Hrsg. von F.-J. Kahlen; S. Flumerfelt & A. Alves. Bd. 89. Cham: Springer International Publishing, S. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.

Gruber 1995

Gruber, T. R. (1995), „Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing?“, *International Journal of Human-Computer Studies* 43.5-6, S. 907–928. DOI: 10.1006/ijhc.1995.1081.

Grundig 2015

Grundig, C.-G. (2015), *Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*. 5., aktualisierte Aufl. München: Hanser.

Grünert 2005

Grünert, T. (2005), *Optimierung im Transport : Band II: Wege und Touren*. Aachen: Shaker.

Gutenschwager & Rabe et al. 2017

Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S. & Wenzel, S. (2017), *Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-55745-7.

Hab & Wagner 2017

Hab, G. & Wagner, R. (2017), *Projektmanagement in der Automobilindustrie: Effizientes Management von Fahrzeugprojekten entlang der Wertschöpfungskette*. 5., aktualisierte und überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler. DOI: 10.1007/978-3-658-10472-6.

Haberfellner & Weck et al. 2019

Haberfellner, R.; Weck, O. de; Fricke, E. & Vössner, S. (2019), *Systems Engineering: Fundamentals and Applications*. Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-13431-0.

Hackenschmidt & Hautsch et al. 2020

Hackenschmidt, R.; Hautsch, S.; Kleinschrodt, C. & Roppel, M. (2020), *Creo Parametric für Einsteiger: Bauteile, Baugruppen und Zeichnungen*. München: Hanser. DOI: 10.3139/9783446461659.

Hagemann 2022

Hagemann, S. (2022), *Algorithmische Konzeption von hochautomatisierten Fließmontagesystemen am Beispiel des automobilen Karosseriebaus*. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin. DOI: 10.14279/depositonce-16131.

Hagemann & Sünnetcioglu et al. 2019

Hagemann, S.; Sünnetcioglu, A. & Stark, R. (2019), „Hybrid Artificial Intelligence System for the Design of Highly-Automated Production Systems“, *Procedia Manufacturing* 28, S. 160–166. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.12.026.

Hassani & Haley 2019

Hassani, K. & Haley, M. (2019), „Unsupervised Multi-Task Feature Learning on Point Clouds“. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Seoul, South Korea*. IEEE, S. 8160–8171.

Heißing & Ersoy et al. 2013

Heißing, B.; Ersoy, M. & Gies, S. (2013), *Fahrwerkhandbuch*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-01992-1.

Henkenjohann & Joppen et al. 2021

Henkenjohann, M.; Joppen, R.; Köchling, D.; Enzberg, S. von; Kühn, A. & Dumitrescu, R. (2021), „Identification and specification of standard modules in production for a material flow simulation“, *Procedia CIRP* 99.1-2, S. 21–26. DOI: 10.1016/j.procir.2021.03.004.

Hermann & Rey et al. 2019

Hermann, L.; Rey, J. & Bergs, T. (2019), „Methodology for an integrative manufacturing change management in technology planning for medical products“, *Proceedings of the International Conference on Competitive Manufacturing (COMA)*, Stellenbosch, South Africa, S. 470–476.

Hillier & Miettinen 1998

Hillier, F. S. & Miettinen, K. (1998), *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Bd. 12. Boston, MA: Springer US. DOI: 10.1007/978-1-4615-5563-6.

Huang & Guan et al. 2018

Huang, X.; Guan, Z. & Yang, L. (2018), „An effective hybrid algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem“, *Advances in Mechanical Engineering* 10.9. DOI: 10.1177/1687814018801442.

Intra 2000

Intra, C. (2000), *Effiziente Produktionsplanung durch eine vereinfachte Ablaufsimulation*. Dissertation. Bd. 30/2000. Berichte aus der Produktionstechnik, Techn. Hochsch. Aachen. Aachen: Shaker.

ISO 10303 2006

ISO 10303 (2006), *ISO 10303 Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 224: Application protocol: Mechanical product definition for process planning using machining features*. International Organization for Standardization.

ISO 42010 2022

ISO 42010 (2022), *ISO/IEC/IEEE 42010 Software, systems and enterprise — Architecture description*. International Organization for Standardization.

Jablonský 2015

Jablonský, J. (2015), „Benchmarks for Current Linear and Mixed Integer Optimization Solvers“, *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 63.6, S. 1923–1928. DOI: 10.11118/201563061923.

Jacob & Windhuber et al. 2018

Jacob, A.; Windhuber, K.; Ranke, D. & Lanza, G. (2018), „Planning, Evaluation and Opti-

mization of Product Design and Manufacturing Technology Chains for New Product and Production Technologies on the Example of Additive Manufacturing“, *Procedia CIRP* 70.7, S. 108–113. DOI: 10.1016/j.procir.2018.02.049.

Kaiser 2023

Kaiser, L. (2023), *Rahmenwerk zur Modellierung einer plausiblen Systemstruktur mechatronischer Systeme*. Dissertation. Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts. Paderborn.

Kampker & Schuh et al. 2011

Kampker, A.; Schuh, G.; Swist, M. & Ivanescu, S. (2011), „Künftige Montagestrukturen für Elektorfahrzeuge“, *ATZproduktion* 4, S. 54–59.

Kampker & Kawollek et al. 2019

Kampker, A.; Kawollek, S.; Fluchs, S. & Marquardt, F. (2019), „Einfluss der Variantenvielfalt auf die automobile Endmontage“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114.7-8, S. 474–479. DOI: 10.3139/104.112097.

Kerber 2016

Kerber, S. (2016), *Prozessgestaltung zum Einsatz digitaler Fabrikgesamtm Modelle*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-14110-3.

Kern 2021

Kern, W. (2021), *Modulare Produktion*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-36300-0.

Kiefer & Breckle et al. 2018

Kiefer, J.; Breckle, T.; Stetter, R. & Manns, M. (2018), „Digital assembly planning using graph-based design languages“, *Procedia CIRP* 72, S. 802–807. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.063.

Klauke 2002

Klauke, S. (2002), *Methoden und Datenmodell der offenen virtuellen Fabrik zur Optimierung simultaner Produktionsprozesse*. Dissertation. Bd. 360. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren, Techn. Univ. Dresden. Düsseldorf: VDI-Verl.

Kleiner & Kramer 2013

Kleiner, S. & Kramer, C. (2013), „Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6“. *Smart Product Engineering*. Hrsg. von M. Abramovici & R. Stark. Lecture Notes in Production Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 93–102. DOI: 10.1007/978-3-642-30817-8_10.

Klocke & Fallböhmer et al. 1998

Klocke, F.; Fallböhmer, M. & Trommer, G. (1998), „Generierung und Bewertung von Prozeßketten“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 93.10, S. 461–464. DOI: 10.1515/zwf-1998-0270.

Kluge 2011

Kluge, S. (2011), *Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme*. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart. DOI: 10.18419/opus-4444.

Knoche 2005

Knoche, K. (2005), *Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien*. Dissertation. Bd. 5/2005. Berichte aus der Produktionstechnik, Techn. Hochsch. Aachen. Aachen: Shaker.

Krahe 2023

Krahe, C. (2023), *KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung: Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen*. Dissertation. Bd. 265. Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe: Shaker Verlag.

Krahe & Marinov et al. 2022

Krahe, C.; Marinov, M.; Schmutz, T.; Hermann, Y.; Bonny, M.; May, M. & Lanza, G. (2022), „AI based geometric similarity search supporting component reuse in engineering design“, *Procedia CIRP* 109.4, S. 275–280. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.249.

Kröll 2007

Kröll, M. (2007), *Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung*. Dissertation. Bd. 468. Universität Stuttgart IPA-IAO-Forschung und Praxis. Heimsheim: Jost-Jetter.

Kuhn & Müller et al. 2020

Kuhn, D.; Müller, R.; Hörauf, L.; Karkowski, M. & Holländer, M. (2020), „Wandlungsfähige Montagesysteme für die nachhaltige Produktion von morgen/Adaptable assembly systems for the sustainable production of tomorrow“, *wt Werkstattstechnik online* 110.09, S. 579–584. DOI: 10.37544/1436-4980-2020-09-9.

Kühn 2006

Kühn, W. (2006), *Digitale Fabrik*. München: Carl Hanser Verlag. DOI: 10.3139/9783446408661.

Lämmle & Seeber et al. 2020

Lämmle, A.; Seeber, C. & Kogan, E. (2020), „Automatic simulation model implementation of robotic production cells in a 3D manufacturing simulation environment“, *Procedia CIRP* 91.2008, S. 336–341. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.185.

Landherr 2014

Landherr, M. H. (2014), *Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung*. Dissertation. Bd. 39. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Law 2015

Law, A. M. (2015), *Simulation Modeling and Analysis*. Fifth Edition. New York: McGraw-Hill US Higher Ed USE Legacy.

Leininger 2022

Leininger, R. (2022), „Ein Ziel – zwei Systeme“, *Blog REFA International Zeitaufnahmen und LEAN Management*. URL: <https://refa-international.com/blog/1979-ein-ziel-zwei-systeme> (besucht am 01. 10. 2024).

Lemaignan & Siadat et al. 2006

Lemaignan, S.; Siadat, A.; Dantan, J.-Y. & Semenenko, A. (2006), „MASON: A Proposal For An Ontology Of Manufacturing Domain“. *Proceedings of the IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications (DIS'06), Budapest, Hungary*. IEEE, S. 195–200. DOI: 10.1109/DIS.2006.48.

Li & Qiao et al. 2022

Li, Y.; Qiao, Z.; Li, M. & Zou, Y. (2022), „Mixed-integer programming for robotic assembly line balancing considering cross-station task and carbon footprint“, *IFAC-PapersOnLine* 55.10, S. 448–451. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.434.

Lopes & Michels et al. 2021

Lopes, T. C.; Michels, A. S.; Sikora, C. G. S.; Brauner, N. & Magatão, L. (2021), „Assembly line balancing for two cycle times: Anticipating demand fluctuations“, *Computers & Industrial Engineering* 162, S. 107685. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107685.

Lopes & Pastre et al. 2020

Lopes, T. C.; Pastre, G. V.; Michels, A. S. & Magatão, L. (2020), „Flexible multi-manned assembly line balancing problem: Model, heuristic procedure, and lower bounds for line length minimization“, *Omega* 95, S. 102063. DOI: 10.1016/j.omega.2019.04.006.

Lopes & Sikora et al. 2017

Lopes, T. C.; Sikora, C.; Molina, R. G.; Schibelbain, D.; Rodrigues, L. & Magatão, L. (2017), „Balancing a robotic spot welding manufacturing line: An industrial case study“, *European Journal of Operational Research* 263.3, S. 1033–1048. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.06.001.

Lupinetti & Chiang et al. 2017

Lupinetti, K.; Chiang, L.; Giannini, F.; Monti, M. & Pernot, J.-P. (2017), „Regular patterns of repeated elements in CAD assembly model retrieval“, *Computer-Aided Design and Applications* 14.4, S. 516–525. DOI: 10.1080/16864360.2016.1257193.

Machalica & Matyjewski 2019

Machalica, D. & Matyjewski, M. (2019), „CAD models clustering with machine learning“, *Archive of Mechanical Engineering* 66.2, S. 133–152. DOI: 10.24425/ame.2019.128441.

Martin & Schäfer et al. 2024

Martin, A.; Schäfer, L.; Fründ, J.; Lützelschwab, J.; Fischer, M.; Lanza, G. & Albers, A. (2024), „A Contribution to MBSE-supported Modeling in Product-Production-CoDesign“. *Proceedings of the 18th Annual IEEE International Systems Conference (SysCon), Montreal, Canada*. Institute of Electrical und Electronics Engineers (IEEE), S. 1–8. DOI: 10.1109/SysCon61195.2024.10553444.

May & Schäfer et al. 2023

May, M. C.; Schäfer, L.; Frey, A.; Krahe, C. & Lanza, G. (2023), „Towards Product-Production-CoDesign for the Production of the Future“, *Procedia CIRP* 119, S. 944–949. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.172.

Mejía-Gutiérrez & Carvajal-Arango 2017

Mejía-Gutiérrez, R. & Carvajal-Arango, R. (2017), „Design Verification through virtual prototyping techniques based on Systems Engineering“, *Research in Engineering Design* 28.4, S. 477–494. DOI: 10.1007/s00163-016-0247-y.

Merhof 2015

Merhof, J. (2015), *Semantische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene*. Dissertation. Bd. 278. Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Michels & Lopes et al. 2018

Michels, A. S.; Lopes, T. C.; Sikora, C. G. S. & Magatão, L. (2018), „The Robotic Assembly Line Design (RALD) problem: Model and case studies with practical extensions“, *Computers & Industrial Engineering* 120, S. 320–333. DOI: 10.1016/j.cie.2018.04.010.

Muckenhirn 2005

Muckenhirn, R. (2005), *Konfigurierbares Leitsystem für modulare Montagezellen am Beispiel von Festplatten*. Dissertation. Bd. 420. IPA-IAO-Forschung und Praxis. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Müller 2018

Müller, J. (2018), *Integrative Gestaltung von Fertigungsprozess- und Prüffolgen für sicherheitskritische Bauteile*. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen.

Müller & Esser et al. 2011

Müller, R.; Esser, M. F. & Eilers, J. (2011), „Rekonfigurationsorientierte Modularisierung von Montagesystemen: E-Mobilität erfordert Wandlungsfähigkeit“, *wt online* 101.9, S. 600–605.

Müller 2008

Müller, S. (2008), *Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen*. Dissertation. Bd. 209. IWB Forschungsberichte, Techn. Univ. München. München: Utz.

Munoz 2023

Munoz, J. F. (2023), „58 Percent Of Chinese Car Brands Are Less Than 10 Years Old“. *Motor1 Numbers*. Hrsg. von C. Smith. Motor1. URL: <https://www.motor1.com/news/663644/58-percent-chinese-car-brands-less-than-10-years-old/> (besucht am 01.10.2024).

Navas-Barrios & Riquett-Rodríguez et al. 2022

Navas-Barrios, E.; Riquett-Rodríguez, A.; Macías-Jiménez, M. A. & Romero-Conrado, A. R. (2022), „An assembling line balancing problem: Lead-acid batteries case study“, *Procedia Computer Science* 203, S. 525–530. DOI: 10.1016/j.procs.2022.07.074.

Neb & Bauernhansl 2021

Neb, A. & Bauernhansl, T. (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.

Neuhausen 2001

Neuhausen, J. (2001), *Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion*. Dissertation. Aachen: Technische Hochschule.

Nickel & Rebennack et al. 2022

Nickel, S.; Rebennack, S.; Stein, O. & Waldmann, K.-H. (2022), *Operations Research*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-65346-3.

Nugraha & Ma'ruf et al. 2021

Nugraha, R. C.; Ma'ruf, A.; Nugraha, A. C. & Halim, A. H. (2021), „A mixed-integer linear programming formulation for assembly line balancing problem with human-robot shared tasks“, *Journal of Physics: Conference Series* 1858.1, S. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/1858/1/012021.

OMG 2017

OMG (2017), *OMG Systems Modeling Language*. Object Management Group.

Ou & Xu 2013

Ou, L.-M. & Xu, X. (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.

Overbeck 2023

Overbeck, L. (2023), *Digital Twins of production systems: Automated validation and update of material flow simulation models with real data*. Dissertation. Bd. 271. Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe: Shaker Verlag.

Pawellek 2014

Pawellek, G. (2014), *Ganzheitliche Fabrikplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-43728-5.

Pieper 2008

Pieper, F. (2008), „Am Anfang war die Idee: Software für den Produktentstehungsprozess“, *QZ* 53.4.

Ponn & Lindemann 2011

Ponn, J. & Lindemann, U. (2011), *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungsformen*. 2. Aufl. 2011. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Pratikakis & Savelonas et al. 2016

Pratikakis, I.; Savelonas, M. A.; Arnaoutoglou, F.; Ioannakis, G.; Koutsoudis, A.; Theoharis, T.; Tran, M.-T.; Nguyen, V.-T.; Pham, V.-K.; Nguyen, H.-D.; Le, H.-A.; Tran, B.-H.; To, H.-Q.; Truong, M.-B.; van Phan, T.; Nguyen, M.-D.; Than, T.-A.; Mac, C.-K.-N.; Do, M. N.; Duong, A.-D.; Furuya, T.; Ohbuchi, R.; Aono, M.; Tashiro, S.; Pickup, D.; Sun, X.; Rosin, P. L. & Martin, R. R. (2016), „SHREC’16 Track: Partial Shape Queries for 3D Object Retrieval“, *Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval, Lisbon, Portugal*, S. 79–88. DOI: 10.2312/3dor.20161091.

Prenting & Battaglin 1964

Prenting, T. O. & Battaglin, R. M. (1964), „The precedence diagram: A tool for analysis in assembly line balancing“, *Journal of Industrial Engineering* 15.4, S. 208–213.

Ranganathan & Corbier et al. 2004

Ranganathan, J.; Corbier, L.; Bhatia, P.; Schmitz, S.; Gage, P. & Oren, K. (2004), *The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard*. Revised Ed. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.

Rea & Corney et al. 2002

Rea, H. J.; Corney, J. R.; Clark, D. E. R.; Pritchard, J.; Breaks, M. L. & Macleod, R. A. (2002), „Part-sourcing in a Global Market“, *Concurrent Engineering* 10.4, S. 325–333. DOI: 10.1177/a032004.

REFA 1990

REFA (1990), *Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme*. 2. Aufl. Methodenlehre der Betriebsorganisation, REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation. München: Hanser.

Rogalewicz & Sika 2016

Rogalewicz, M. & Sika, R. (2016), „Methodologies of Knowledge Discovery from Data and Data Mining Methods in Mechanical Engineering“, *Management and Production Engineering Review* 7.4, S. 97–108. DOI: 10.1515/MPER-2016-0040.

Roj & Sommer et al. 2021

Roj, R.; Sommer, M.; Woyand, H.-B.; Theiss, R. & Dueltgen, P. (2021), „Classification of CAD-Models Based on Graph Structures and Machine Learning“, *Computer-Aided Design and Applications* 19.3, S. 449–469. DOI: 10.14733/cadaps.2022.449-469.

Roshani & Giglio 2015

Roshani, A. & Giglio, D. (2015), „A Mathematical Programming Formulation for Cost-oriented Multi-manned Assembly Line Balancing Problem“, *IFAC-PapersOnLine* 48.3, S. 2293–2298. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.429.

Roth & Kalchschmid et al. 2021

Roth, S.; Kalchschmid, V. & Reinhart, G. (2021), „Development and evaluation of risk treatment paths within energy-oriented production planning and control“, *Production Engineering* 15.3-4, S. 413–430. DOI: 10.1007/s11740-021-01043-5.

Rubinovitz & Bukchin et al. 1993

Rubinovitz, J.; Bukchin, J. & Lenz, E. (1993), „RALB – A Heuristic Algorithm for Design and Balancing of Robotic Assembly Lines“, *CIRP Annals* 42.1, S. 497–500. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62494-9.

Rudolf 2013

Rudolf, S. (2013), *Produktionsgerechte Baukastengestaltung*. Dissertation. Bd. 30. Produktionssystematik, Technische Hochschule Aachen, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT. Aachen: Apprimus-Verl.

Şahin & Kellegöz 2019

Şahin, M. & Kellegöz, T. (2019), „A new mixed-integer linear programming formulation and particle swarm optimization based hybrid heuristic for the problem of resource investment and balancing of the assembly line with multi-manned workstations“, *Computers & Industrial Engineering* 133, S. 107–120. DOI: 10.1016/j.cie.2019.04.056.

Salveson 1955

Salveson, M. E. (1955), „The Assembly-Line Balancing Problem“, *Journal of Fluids Engineering* 77.6, S. 939–947. DOI: 10.1115/1.4014559.

Schäfer & Frank et al. 2022

Schäfer, L.; Frank, A.; May, M. C. & Lanza, G. (2022), „Automated Derivation of Optimal Production Sequences from Product Data“, *Procedia CIRP* 107.04, S. 469–474. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.010.

Schäfer & Freund 2024

Schäfer, L. & Freund, J. (2024), „BENTELER Rolls Out the Production Technology of Tomorrow With the Help of Visual Components“, *Visual Components Case Study*. URL: https://www.visualcomponents.com/resources/case_studies/benteler-case-study-developing-the-production-technology-of-tomorrow/ (besucht am 01.10.2024).

Schäfer & Günther et al. 2023

Schäfer, L.; Günther, M.; Martin, A.; Lüpfer, M.; Mandel, C.; Rapp, S.; Lanza, G.; Anacker, H.; Albers, A. & Köchling, D. (2023), „Systematics for an Integrative Modelling of Product and Production System“, *Procedia CIRP* 118.04, S. 104–109. DOI: 10.1016/j.procir.2023.06.019.

Schäfer & Klenk et al. 2024

Schäfer, L.; Klenk, F.; Maier, T.; Zehner, M.; Peukert, S.; Linzbach, R.; Treiber, T. & Lanza, G. (2024), „A systematic approach for simulation-based dimensioning of production systems during the concept phase of factory planning“, *Production Engineering* 21.3, S. 215. DOI: 10.1007/s11740-024-01273-3.

Schäfer & Kochendörfer et al. 2023

Schäfer, L.; Kochendörfer, P.; May, M. C. & Lanza, G. (2023), „Planning and Multi-Objective Optimization of Production Systems by means of Assembly Line Balancing“, *Procedia CIRP* 120.3, S. 1125–1130. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.136.

Schäfer & Krahe 2022

Schäfer, L. & Krahe, C. (2022), „KI-Assistenzsysteme in der Produktentwicklung“. *Potentiale digitaler Führung und Technologien für die Teaminteraktion von morgen*. Hrsg. von G. Lanza; P. Nieken; P. Nyhuis & A. Trübswetter. Karlsruhe: TEWISS Verl., S. 68–74.

Schäfer & Treml et al. 2023

Schäfer, L.; Treml, N.; May, M. C. & Lanza, G. (2023), „Classifying Parts using Feature Extraction and Similarity Assessment“, *Procedia CIRP* 119, S. 822–827. DOI: 10.1016/j.procir.2023.03.127.

Schäfer & Tse et al. 2024

Schäfer, L.; Tse, S.; May, M. C. & Lanza, G. (2024), „Multi-Objective Mathematical Optimization in Assisted Production Planning“. *31st EurOMA Conference, Transforming People and Processes for a better World, Barcelona, Spanien Proceedings*. Hrsg. von C. Gimenez; C. Sancha; C. Roig & G. Gomez. European Operations Management Association. DOI: 10.5445/IR/1000172572.

Schäfer & Tse et al. 2025

Schäfer, L.; Tse, S.; May, M. C. & Lanza, G. (2025), „Assisted Production System Planning by means of Complex Robotic Assembly Line Balancing“, *Journal of Manufacturing Systems* 78.3, S. 109–123. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.11.008.

Schäfer & Moll et al. 2019

Schäfer, M.; Moll, P.; Brocke, L.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2019), „Model for Web-Application based Configuration of Modular Production Plants with automated PLC Line Control Code Generation“, *Procedia CIRP* 83.2, S. 292–297. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.126.

Schenk & Wirth et al. 2014

Schenk, M.; Wirth, S. & Müller, E. (2014), *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*. 2. Aufl. 2014. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Schlick & Bruder et al. 2010

Schlick, C. M.; Bruder, R. & Luczak, H. (2010), *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-78333-6.

Schmigalla 1995

Schmigalla, H. (1995), *Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge*. 1. Auflage. REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation. München: Carl Hanser Verlag.

Schuh 2007

Schuh, G. (2007), *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung Und Konzepte*. VDI-Buch. Dordrecht: Springer.

Schuh & Brussel et al. 2003

Schuh, G.; Brussel, H. van; Boër, C. R.; Valckenaers, P.; Sacco, M.; Bergholz, M. & Harre, J. (2003), „A model-based approach to design modular plant architectures“. *Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems: Progress in virtual manufacturing systems, Saarbrücken, Germany*. Hrsg. von H. Bley. Saarbrücken: Univ. des Saarlandes, S. 369–373.

Schuh & Güzlaff et al. 2020

Schuh, G.; Güzlaff, A.; Sauermann, F. & Theunissen, T. (2020), „Application of time series data mining for the prediction of transition times in production“, *Procedia CIRP* 93.3, S. 897–902. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.054.

Schuh & Prote et al. 2019

Schuh, G.; Prote, J.-P.; Güzlaff, A.; Cremer, S. & Schmitz, S. (2019), „Process Mining im Prototypenbau“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114.11, S. 707–710. DOI: 10.3139/104.112186.

Schuh & Riesener 2017

Schuh, G. & Riesener, M. (2017), *Produktkomplexität managen*. München: Carl Hanser Verlag. DOI: 10.3139/9783446453340.

Schuh & Rudolf et al. 2014

Schuh, G.; Rudolf, S.; Riesener, M. & Bruchmann, S. (2014), „Smart Product Variety“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109.5, S. 297–300. DOI: 10.3139/104.111153.

Schuh & Stich 2012

Schuh, G. & Stich, V., Hrsg. (2012), *Produktionsplanung und -steuerung*. 4., überarbeitete Auflage. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Schuh & Stich et al. 2011

Schuh, G.; Stich, V.; Brosze, T.; Fuchs, S.; Pulz, C.; Quick, J.; Schürmeyer, M. & Bauhoff, F. (2011), „High resolution supply chain management: optimized processes based on self-optimizing control loops and real time data“, *Production Engineering* 5.4, S. 433–442. DOI: 10.1007/s11740-011-0320-3.

Spath & Baumeister et al. 2002

Spath, D.; Baumeister, M. & Rasch, D. (2002), „Wandlungsfähigkeit und Planung von Fabriken - Ein Ansatz durch Fabriktypologisierung und unterstützenden Strukturbaukasten“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 1-2, S. 28–32.

Srinivas & Patnaik 1994

Srinivas, M. & Patnaik, L. M. (1994), „Genetic algorithms: a survey“, *Computer* 27.6, S. 17–26. DOI: 10.1109/2.294849.

Stähr & Stricker et al. 2020

Stähr, T.; Stricker, N. & Lanza, G. (2020), „Autonomous planning tool for changeable assembly systems“, *Procedia CIRP* 88.2, S. 104–109. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.019.

Stoll 2017

Stoll, J. (2017), *Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung*. Dissertation. Bd. 202. Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe: Shaker Verlag.

Su 2009

Su, Q. (2009), „A hierarchical approach on assembly sequence planning and optimal sequences analyzing“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 25.1, S. 224–234. DOI: 10.1016/j.rcim.2007.11.006.

Sudhoff 2023

Sudhoff, M. (2023), *Methodik zur datengetriebenen Prozesszeitprognose für manuelle Montagesysteme*. Dissertation. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme. Bochum: Universitätsbibliothek Ruhr-Universität Bochum.

Sun & Tagliasacchi et al. 2020

Sun, W.; Tagliasacchi, A.; Deng, B.; Sabour, S.; Yazdani, S.; Hinton, G. & Yi, K. M. (2020), „Canonical Capsules: Self-Supervised Capsules in Canonical Pose“, *Advances in Neural Information Processing Systems*, S. 24993–25005. arXiv: 2012.04718.

Terkaj & Urgo 2014

Terkaj, W. & Urgo, M. (2014), „Ontology-based modeling of production systems for design and performance evaluation“, *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Porto Alegre, Brazil*. DOI: 10.1109/INDIN.2014.6945606.

Thiede 2012

Thiede, S. (2012), *Energy Efficiency in Manufacturing Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-25914-2.

Thiede & Seow et al. 2013

Thiede, S.; Seow, Y.; Andersson, J. & Johansson, B. (2013), „Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation—State of the art and research perspectives“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6.1, S. 78–87. DOI: 10.1016/j.cirpj.2012.10.004.

Tihlarik 2024

Tihlarik, A. (2024), „Evaluation of the use of AI technologies in German engineering: insights from the employee perspective“, *Discover Global Society* 2.1, S. 254. DOI: 10.1007/s44282-024-00051-x.

Trommer 2001

Trommer, G. (2001), *Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen*. Dissertation. Bd. 15/2001. Berichte aus der Produktionstechnik, Techn. Hochsch. Aachen. Aachen: Shaker.

Tsai & Chang 2005

Tsai, C.-Y. & Chang, C. A. (2005), „A two-stage fuzzy approach to feature-based design retrieval“, *Computers in Industry* 56.5, S. 493–505. DOI: 10.1016/j.compind.2005.02.001.

van Blokland & Theoharis 2021

van Blokland, B. I. & Theoharis, T. (2021), „Partial 3D object retrieval using local binary QUICCI descriptors and dissimilarity tree indexing“, *Computers & Graphics* 100.5, S. 32–42. DOI: 10.1016/j.cag.2021.07.018.

van der Aalst 2016

van der Aalst, W. (2016), *Process Mining*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-49851-4.

van der Maaten & Hinton 2008

van der Maaten, L. & Hinton, G. (2008), „Visualizing Data using t-SNE“, *Journal of Machine Learning Research* 86.9, S. 2579–2605.

VDI 2206 2002

VDI 2206 (2002), *VDI 2206 Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*. Berlin: Beuth Verlag.

VDI 2223 2004

VDI 2223 (2004), *VDI 2223 Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Berlin: Beuth Verlag.

VDI 3633 2014

VDI 3633 (2014), *VDI 3633 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Grundlagen Blatt 1*. Düsseldorf: VDI Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL).

VDI 4499 2008

VDI 4499 (2008), *VDI 4499 Digitale Fabrik: Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag.

Verma & Pant et al. 2021

Verma, S.; Pant, M. & Snasel, V. (2021), „A Comprehensive Review on NSGA-II for Multi-Objective Combinatorial Optimization Problems“, *IEEE Access* 9, S. 57757–57791. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3070634.

Walla 2017

Walla, W. (2017), *Standard- und Modulbasierte digitale Rohbauprozesskette: Frühzeitige Produktbeeinflussung bezüglich Produktionsanforderungen im Karosserierohbau der Automobilindustrie*. Dissertation. Bd. 2017.1. Informationsmanagement im Engineering, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. DOI: 10.5445/KSP/1000061838.

Wazir & Langs et al. 2022

Wazir, R.; Langs, G. & Cadonna, A. (2022), „Statistik – Grundlagen“. *Handbuch Data Science und KI*. Hrsg. von S. Papp; W. Weidinger; K. Munro; B. Ortner; A. Cadonna; G. Langs; R. Licandro; M. Meir-Huber; D. Nikolić; Z. Toth; B. Vesela; R. Wazir & G. Zauner. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, S. 196–219. DOI: 10.3139/9783446472457.007.

Welsing & Maetschke et al. 2021

Welsing, M.; Maetschke, J.; Thomas, K.; Gützlaß, A.; Schuh, G. & Meusert, S. (2021), „Combining Process Mining and Machine Learning for Lead Time Prediction in High Variance Processes“. *Production at the leading edge of technology*. Hrsg. von B.-A. Behrens; A. Brosius; W. Hintze; S. Ihlenfeldt & J. P. Wulfsberg. Bd. 62. Lecture Notes in Production Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 528–537. DOI: 10.1007/978-3-662-62138-7_53.

Wenzel & Weiß et al. 2008

Wenzel, S.; Weiß, M.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H. & Rose, O. (2008), *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-35276-1.

Westkämper 2006

Westkämper, E. (2006), *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/3-540-30764-8.

Westkämper 2013

Westkämper, E. (2013), „Struktureller Wandel durch Megatrends“. *Digitale Produktion*. Hrsg.

von E. Westkämper; D. Spath; C. Constantinescu & J. Lentjes. Bd. 64. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 7–9. DOI: 10.1007/978-3-642-20259-9_2.

Westkämper & Löffler 2016

Westkämper, E. & Löffler, C. (2016), *Strategien der Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-48914-7.

Westkämper & Spath et al. 2013

Westkämper, E.; Spath, D.; Constantinescu, C. & Lentjes, J., Hrsg. (2013), *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-20259-9.

Wiendahl & Denner 2020

Wiendahl, H.-H. & Denner, T. (2020), „Arbeitsplanung“. *Fabrikbetriebslehre 1*. Hrsg. von T. Bauernhansl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 165–191. DOI: 10.1007/978-3-662-44538-9_6.

Wiendahl & Reichardt et al. 2014

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J. & Nyhuis, P. (2014), *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. 2., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser. DOI: 10.3139/9783446437029.

Wirth & Hipp 2000

Wirth, R. & Hipp, J. (2000), „Towards a standard process model for data mining“, *Proceedings of the 4th International Conference on the Practical Applications of Knowledge Discovery and Data Mining, Manchester, UK*, S. 29–40.

Wolfe 2023

Wolfe, C. R. (2023), „Shape Reconstruction with ONets: Representing 3D space with learnable functions“, *Towards Data Science 2*. URL: <https://towardsdatascience.com/shape-reconstruction-with-onets-1c1afe89c50> (besucht am 01. 10. 2024).

Wu & Zhou et al. 2022

Wu, C.; Zhou, K.; Kaiser, J.-P.; Mitschke, N.; Klein, J.-F.; Pfrommer, J.; Beyerer, J.; Lanza, G.; Heizmann, M. & Furmans, K. (2022), „MotorFactory: A Blender Add-on for Large Dataset Generation of Small Electric Motors“, *Procedia CIRP* 106, S. 138–143. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.168.

Yang & Feng et al. 2017

Yang, Y.; Feng, C.; Shen, Y. & Tian, D. (2017), „FoldingNet: Point Cloud Auto-encoder via Deep Grid Deformation“, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, USA*, S. 206–215. arXiv: 1712.07262.

Yilmaz & Yilmaz 2020

Yilmaz, H. & Yilmaz, M. (2020), „A mathematical model and tabu search algorithm for

multi-manned assembly line balancing problems with assignment restrictions“, *Engineering Optimization* 52.5, S. 856–874. DOI: 10.1080/0305215X.2019.1618288.

Yuan & Xu et al. 2015

Yuan, P.; Xu, Q. & Song, H. (2015), „Two-Sided with Multi-parallel Stations Assembly Line Balancing Problem and Algorithm“. *2015 8th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), Hangzhou, China*. IEEE, S. 602–605. DOI: 10.1109/ISCID.2015.299.

Zäh & Wagner 2003

Zäh, M. F. & Wagner, W. (2003), „Planning Minifactory Structures for the Close-to-Market Manufacture of Individualized Products“. *Proceedings of the 2003 World Congress on Mass Customization and Personalization (MCPC 2003), Munich, Germany*. Hrsg. von F. T. Piller. München: Technische Universität München.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Die Ebenen der Produktion nach Wiendahl; Reichardt et al. (2014) (eigene Darstellung).	7
2.2	Die Phasen der Produktionsplanung (eigene Darstellung in Anlehnung an Kiefer; Breckle et al. 2018) mit Unterscheidung zwischen Neu- und Ablaufplanung nach Eversheim (2002) und dem Grad der informationstechnischen Unterstützung (eigene Darstellung in Anlehnung an Klauke 2002).	8
2.3	Die ersten vier Hauptgruppen der DIN 8580 mit Fokus auf die Aufgabe der Planung von Fügefolgen nach Burr (2008) (eigene Darstellung).	11
2.4	Traversierung (eigene Darstellung nach Schäfer; Kochendörfer et al. 2023).	11
2.5	Funktionsweise Genetischer Algorithmus und NSGA-II (eigene Darstellung in Anlehnung an Verma; Pant et al. 2021).	14
2.6	Annahmen des SALBP nach Boysen; Fliedner et al. (2007) (eigene Darstellung nach Schäfer; Tse et al. 2025).	16
2.7	Kategorien des Simple Assembly Line Balancing Problems (SALBP) nach Boysen; Fliedner et al. (2007) (eigene Darstellung).	17
2.8	Annahmen des RALBP nach Chutima (2022) (eigene Darstellung nach Schäfer; Tse et al. 2025).	17
2.9	Das PPR-Modell nach Feldmann; Schmuck et al. (2008) (eigene Darstellung in Anlehnung an Hagemann; Sünnetcioglu et al. 2019).	20
2.10	Eine Auswahl verschiedener, gängiger Produktmodelle (eigene Darstellung).	21
2.11	Strukturen zur Darstellung von Abfolgerestriktionen in Vorranggraphen und -matrizen (eigene Darstellung in Anlehnung an Muckenhirn 2005) und Beispiel für einen Vorranggraphen und dessen zugehörige Vorrangmatrix (eigene Darstellung in Anlehnung Schuh; Prote et al. 2019).	22
2.12	Die Bestandteile eines Systemmodells im Sinne des Model-Based Systems Engineering (eigene Darstellung in Anlehnung an Delligatti 2014).	23
2.13	Eignung der Verfahren nach REFA und MTM (eigene Darstellung in Anlehnung an Leininger 2022).	25
2.14	Verfahren des Data Mining (eigene Darstellung).	25
2.15	Entstehung eines digitalen Zwillings aus der Produktionssystemplanung heraus (eigene Darstellung in Anlehnung an Grieves & Vickers 2017). . . .	27
3.1	Scope und Teildisziplinen A, B, C und D der betrachteten Grobplanung (eigene Darstellung).	29
3.2	Übersicht der ProSyCo-Ontologie (eigene Darstellung nach Bauer 2014). .	44

3.3	PPR-Modell am Beispiel eines Elektromotors (eigene Darstellung nach Feldmann; Schmuck et al. 2008).	44
3.4	Modularisierung zweier Stationen (eigene Darstellung nach Kluge 2011).	49
3.5	Übersicht über den Stand der Forschung (eigene Darstellung).	52
4.1	Methode zur assistierten Produktionssystemplanung (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer; Tse et al. 2025).	56
4.2	Struktur des eigenen Ansatzes in Kapitel 4 (eigene Darstellung).	57
4.3	Allgemeines Vorgehen zur Ähnlichkeitsanalyse von Produkten (eigene Darstellung).	59
4.4	Clustering der Datenbasis und datengetriebener Aufbau eines Produktbaukasten (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer; Tremel et al. 2023).	60
4.5	kNN -Klassifikation neuer Datenpunkte und Zuordnung zum Produktbaukasten (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer; Tremel et al. 2023).	61
4.6	Ähnlichkeitsanalyse von Punktwolken mittels Autoencoder (eigene Darstellung in Anlehnung an Krahe 2023).	65
4.7	Ähnlichkeitsanalyse mittels QUICCI-Deskriptoren (eigene Darstellung in Anlehnung an van Blokland & Theoharis 2021; Bildquelle: Mercedes-Benz).	66
4.8	Einordnung der vorgestellten Lösungsansätze (eigene Darstellung).	67
4.9	Auswahl geeigneter Lösungsansätze (eigene Darstellung).	68
4.10	Freiheitsgrade des Elektromotors (eigene Darstellung).	68
4.11	Blender Add-On zur synthetischen Erzeugung von CAD-Objekten des Elektromotors (eigene Darstellung in Anlehnung an Wu; Zhou et al. 2022).	69
4.12	Vorgehen zur Ableitung des Prozessvorranggraphen (eigene Darstellung).	70
4.13	Problem einer inkonsistenten Modellierung von Produkt- und Fügestruktur (eigene Darstellung).	72
4.14	Relevanter Auszug aus der MoSyS-Ontologie für PPR-Systeme (eigene Darstellung nach Schäfer; Günther et al. 2023).	74
4.15	Methode für die Entwicklung von PPR-Systemen in Anlehnung an Schäfer; Günther et al. (2023) und A_Schenkel (2023) ¹ (eigene Darstellung).	75
4.16	Attribut-Definition von Elementen und Features (eigene Darstellung).	76
4.17	Ausschnitt der Referenzarchitektur des Produktmodells (eigene Darstellung).	77
4.18	Auszug aus den Klassen nach DIN 8580 (oben) und den Attributen (unten) des Prozessmodells (eigene Darstellung).	78
4.19	Ausschnitt aus der Referenzarchitektur des Produktionssystemmodells (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schenkel 2023).	79
4.20	Allokation von Feature und Prozess anhand einer Allocation Matrix (links) und einem BDD (rechts) (eigene Darstellung).	81

4.21	Constraints zwischen Attributen von Produkt, Prozess und Produktionssystem (eigene Darstellung).	82
4.22	Ableitung und Berechnung von Attributen anhand von Constraints (eigene Darstellung).	83
4.23	Vereinfacht sequenzielle Darstellung des CRISP-DM Vorgehens nach Wirth & Hipp (2000) ergänzt in A_Gese (2024) (eigene Darstellung).	84
4.24	Allgemeine Einflussgrößen auf die gemessene Ist-Produktionszeit (eigene Darstellung in Anlehnung an Sudhoff 2023).	85
4.25	Matrix zur Auswahl geeigneter datengetriebener Verfahren zur Planzeitbestimmung (eigene Darstellung nach A_Gese 2024).	86
4.26	Auswahl von scikit-learn Regressionsalgorithmen (eigene Darstellung in Anlehnung an scikit-learn ¹).	87
4.27	Beispielhafter Entscheidungsbaum zur Planzeitbestimmung (eigene Darstellung in Anlehnung an Welsing; Maetschke et al. 2021).	88
4.28	Vorgehen zur Optimierung des Produktionssystems (eigene Darstellung). .	89
4.29	Visualisierung der Übergabe von Zwischenprodukten (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).	98
4.30	Beispiel der Variablenbelegung des Erweiterungsmodells beim Verbinden zweier Bauteile (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023). .	102
4.31	Vorgehen zur Visualisierung und Simulation (eigene Darstellung).	104
4.32	Lösungsansatz als sequenzielles Phasen-Meilenstein-Diagramm (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer; Klenk et al. 2024).	105
4.33	Modularisierung am Beispiel zweier Stationen (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).	106
4.34	Implementierung eines 3D-Modulkatalogs in Visual Components (eigene Darstellung).	107
5.1	Grundelemente einer Verbundlenkerachse (eigene Darstellung).	110
5.2	Freiheitsgrade einer Verbundlenkerachse (eigene Darstellung).	110
5.3	Einfacher KNIME-Workflow zum Clustering der Bauteile (eigene Darstellung). .	111
5.4	Fusionierte Erzeugung der Punktwolken für 6 Klassen (eigene Darstellung). .	113
5.5	t-SNE Visualisierung von latenten Vektoren (eigene Darstellung).	113
5.6	Anzahl der Votes des disassembly tree in Abhängigkeit der Anfragen (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Ortiz Lizarraga 2024).	114
5.7	Qualitative Evaluation ähnlicher Objekte (eigene Darstellung nach A_Ortiz Lizarraga 2024).	115
5.8	Links: Exemplarische Bauteil-Instanzen inkl. Attribute. Rechts: Exemplarische Beziehungen zwischen Bauteilen und Features. (eigene Darstellung) .	116

5.9	Exemplarische Wechselwirkungen zwischen Produkt-, Prozess- und Produktionssystemmodell (eigene Darstellung).	118
5.10	Modellierung zeitbezogener Constraints (eigene Darstellung).	119
5.11	Charakterisierung der Arbeitsabläufe (eigene Darstellung).	120
5.12	Angenäherte Zugschlagsfaktoren in Abhängigkeit der Blechdicke und Materialsorte (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Gese 2024).	121
5.13	Korrelation zwischen berechneter Grundzeit und Ist-Zeit (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Gese 2024).	121
5.14	Struktur des albalancer Package inkl. Methodenaufrufe durch das Interface (eigene Darstellung nach Schäfer; Tse et al. 2025).	126
5.15	Konvergenz des genetischen Algorithmus (eigene Darstellung nach Schäfer; Tse et al. 2025).	127
5.16	Ergebnisse der heuristischen Voruntersuchung mittels genetischem Algorithmus (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer; Tse et al. 2025). . . .	128
5.17	Sensitivitätsanalyse der einkriteriellen, heuristischen Voruntersuchung (eigene Darstellung nach Schäfer; Tse et al. 2025).	128
5.18	Darstellung der Aufgabenzuordnung als Gantt-Diagramm (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).	130
5.19	Darstellung Pareto-effizienter Lösungen anhand der Zielkriterien Kosten, Fläche und Qualität (eigene Darstellung nach Schäfer; Tse et al. 2025). . .	133
5.20	Identifizierte Module der 3D-Simulation (eigene Darstellung).	136
5.21	Wirkstrukturmodell der Verkettung von OC und TC (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).	137
5.22	Materialfluss von zwei exemplarisch verketteten Stationen mit Drehtisch, Robotertransfer und manueller Beladung der Anbauteile (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).	138
5.23	Nutzung zur 3D-Layoutplanung (eigene Darstellung).	139
5.24	Manueller Planungsprozess beim Zulieferer (eigene Darstellung).	140
5.25	Ergebnis der manuellen Planung beim Zulieferer (eigene Darstellung). . . .	141
A1.1	Visualisierung der Forschungslücke (eigene Darstellung).	XVIII
A1.2	Legende mit Zusammenhang zwischen Autor (alphabetisch sortiert) und dem in Abbildung A1.1 dargestellten Index.	XIX
A2.1	Ausschnitt aus der Referenzarchitektur des Produktionssystemmodells (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schenkel 2023).	XXI
A3.1	Auswahl der Taktzeit-Constraints anhand eines Entscheidungsbaums (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).	XXXV

A4.1	Skalierungsoptionen für den Hochlauf ausgehend von einem Basiswertstrom (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer; Klenk et al. 2024).	XXXVI
A4.2	Struktur der Hochlaufsimulation mit AnyLogic (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer; Klenk et al. 2024).	XXXVI
A4.3	Variationsparameter der Ressourcen (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Zehner 2022).	XXXVI
A5.1	Betrachtungsgegenstand im Anwendungsfall (eigene Darstellung).	XXXVII
A5.2	Wertstromanalyse des betrachteten Produktionsbereichs (eigene Darstellung)	XXXVIII
A6.1	Clustering der Bauteile mit geometriebeschreibenden Merkmalen: Clustering Ergebnis durch Farben abgebildet (Schäfer; Tremel et al. 2023).	XXXIX
A6.2	Detaillierte Architektur des Autoencoders basierend auf Yang; Feng et al. (2017) (eigene Darstellung nach Krahe 2023).	XLII
A6.3	Einfluss des Radius auf die Precision (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Ortiz Lizarraga 2024).	XLV
A6.4	Einfluss der Größe des QUICCI-Deskriptors auf die Precision (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Ortiz Lizarraga 2024).	XLVI
A6.5	Einfluss von Bogen- und Winkeltoleranz auf die Precision (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Ortiz Lizarraga 2024).	XLVI
A6.6	Einfluss der Modellgröße auf die Suchzeit (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Ortiz Lizarraga 2024).	XLVII
A7.1	Ausschnitt des instanziierten Produktionssystemmodells im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung nach A_Schenkel 2023).	LI
A7.2	Exemplarische Wechselwirkungen zwischen Produkt-, Prozess- und Produktionssystemmodell (eigene Darstellung).	LII
A7.3	Ausschnitt des Maximalvorranggraphen der Verbundlenkerachse im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung nach A_Schenkel 2023).	LIII
A7.4	Modellierung zeitbezogener Constraints (eigene Darstellung).	LIV
A7.5	Oben links: SysML Satisfy-Matrix zwischen Anforderungen und Systemelementen. Oben rechts: SysML Allocatin-Matrix zwischen Systemelementen und Prozessschritten. Unten: Ergebnis der konsistenten Modellierung – Prozessschritte und deren explizit und implizit verbundene Elemente. (eigene Darstellung nach Martin; Schäfer et al. 2024).	LV
A8.1	Variantenspezifischer Vorranggraph im Anwendungsfall.	LIX
A8.2	Belegung der resultierenden 7 Stationen bei exakter, einkriterieller Kostenminimierung (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023). . . .	LXVII
A8.3	Belegung der resultierenden 7 Stationen bei exakter, einkriterieller Flächenminimierung (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023). . . .	LXVIII

A8.4	Belegung der resultierenden 7 Stationen bei exakter, einkriterieller Qualitätsoptimierung (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).	LXIX
A8.5	Teil 1 – Belegung der resultierenden 20 Stationen bei exakter, einkriterieller Maximierung der Taktzeitreserve (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).	LXX
A8.6	Belegung der resultierenden 7 Stationen bei exakter, multikriterieller Optimierung (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer; Tse et al. 2025).	LXXII
A8.7	Belegung der resultierenden 7 Stationen bei exakter, multikriterieller Optimierung mit Modellerweiterung I (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).	LXXIII
A8.8	Belegung der resultierenden 6 Stationen bei exakter, multikriterieller Optimierung mit Modellerweiterung II (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schukraft 2024).	LXXIV
A9.1	Grafcet Diagramm einer Orbit Cell (OC) im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).	LXXV
A9.2	Grafcet Diagramm einer Turntable Cell (TC) im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).	LXXVI
A9.3	Visual Components Prozessablaufkonfiguration eines Drehtischs im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).	LXXVII
A9.4	Visual Components Prozessablaufkonfiguration der Handhabungsseite im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).	LXXVIII
A9.5	Visual Components Prozessablaufkonfiguration der Bearbeitungsseite im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).	LXXIX
A9.6	Stationen einer exemplarischen Linie im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).	LXXX
A9.7	Prozessknoten (links) und Materialfluss (rechts) einer exemplarischen Linie im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).	LXXXI
A9.8	Basiswertstrom und mögliche Skalierungsoptionen (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Zehner 2022).	LXXXII
A9.9	Stückkosten über den Produktionshochlauf abhängig von verschiedenen Skalierungsoptionen (eigene Darstellung nach Schäfer; Klenk et al. 2024).	LXXXIII
A9.10	Vergleich von minimalen und maximalen Kosten (eigene Darstellung nach Schäfer; Klenk et al. 2024).	LXXXIV

Tabellenverzeichnis

2.1	Varianten des Robotic Assembly Line Balancing Problems nach Chutima (2022).	18
2.2	Morphologischer Kasten zur Wahl der Modellierungstiefe.	27
3.1	Klassifikationssystem für ALBP nach Boysen; Fliedner et al. (2007).	33
4.1	Auswahl geometriebeschreibender Merkmale nach Schäfer; Tremml et al. (2023).	64
4.2	Arten von Features nach Bihler (1999), ergänzt um das für diese Arbeit relevante Verbindungs-Feature.	76
4.3	Attribute zur Beschreibung des Schweißprozesses in Anlehnung an das Standardwerk „Tabellenbuch Metall“ nach Gomeringer; Kilgus et al. (2022).	78
4.4	Zu- bzw. nicht zutreffende Annahmen des Simple (S) (Boysen; Fliedner et al. 2007) und Robotic (R) (Chutima 2022) ALBP nach Schäfer; Tse et al. (2025).	91
4.5	Skalierungsoptionen und deren Einfluss nach Schäfer; Klenk et al. (2024) basierend auf Kampker; Schuh et al. (2011) und Eilers (2015).	106
5.1	Ergebnisse der Analyse in Schäfer; Tremml et al. (2023).	112
5.2	Modularer Aufbau der Stationen in der RTB-Herstellung.	117
5.3	Ergebnisse der datengetriebenen Modellierung in Anlehnung an A_Gese (2024).	122
5.4	Komplexität des betrachteten Optimierungsproblems.	124
5.5	Funktionale Beschreibung der Mutationen und Reparaturmechanismen.	126
5.6	Übersicht über die Ergebnisse der exakten Optimierung in Anlehnung an Schäfer; Tse et al. (2025).	129
5.7	Linienkonfiguration bei einkriterieller Kostenminimierung nach Schäfer; Tse et al. (2025).	130
5.8	Linienkonfiguration bei einkriterieller Flächenminimierung.	131
5.9	Linienkonfiguration bei einkriterieller Qualitätsoptimierung.	131
5.10	Linienkonfiguration bei multikriterieller Optimierung nach Schäfer; Tse et al. (2025).	132
5.11	Übersicht über die Ergebnisse der exakten Optimierung bei Modellerweiterung I in Anlehnung an A_Schneider (2023).	134
5.12	Linienkonfiguration bei multikriterieller Optimierung des 1. Erweiterungsmodells.	134
5.13	Übersicht über die Ergebnisse der exakten Optimierung bei Modellerweiterung II in Anlehnung an A_Schukraft (2024).	135

5.14	Linienkonfiguration bei multikriterieller Optimierung des 2. Erweiterungsmodells.	135
5.15	Implementierung in Visual Components.	138
5.16	Qualitativer Vergleich der Linienkonfiguration.	142
5.17	Quantitativer Vergleich der Lösungen nach Schäfer; Tse et al. (2025).	142
A2.1	Attribute zur Beschreibung des Bohrens nach Gomeringer; Kilgus et al. (2022).	XX
A2.2	Attribute zur Beschreibung des Fräsens nach Gomeringer; Kilgus et al. (2022).	XX
A3.1	Variablen des ALB Modells.	XXII
A3.2	Parameter des ALB Modells.	XXIII
A3.3	Variablen des Erweiterungsmodells.	XXX
A6.1	Größe des dissimilarity tree abhängig von den gewählten Hyperparametern.	XLIII
A6.2	Standardparameter nach van Blokland & Theoharis (2021).	XLIV
A6.3	Benchmark Ergebnisse für Standardparameter.	XLV
A7.1	Produktstruktur gemäß des RTB Baukastens im Anwendungsbeispiel.	XLVIII
A7.2	SysML Instanztafel des RTB Produktmodells nach A_Schenkel 2023.	L
A8.1	Equipmentkosten im Anwendungsfall.	LVI
A8.2	Equipmentabhängige Zeiten im Anwendungsfall.	LVI
A8.3	Flächenbedarfe des Stationsequipments im Anwendungsfall.	LVI
A8.4	Im Modell als Parameter eingeführte Gesamtkosten.	LVI
A8.5	Übersicht über Einzelteile und teilbezogene Daten im Anwendungsfall.	LVII
A8.6	Aufgaben und zugehörige Zeiten im Anwendungsfall.	LVIII
A8.7	Übersicht über die Ergebnisse bei umgekehrter Ordnungsrelation des 1. Erweiterungsmodells in Anlehnung an A_Schneider (2023).	LXXIII
A9.1	Skalierungsoptionen im Anwendungsbeispiel nach Schäfer; Klenk et al. (2024).	LXXXIII
A10.1	Details der manuell geplanten Linienkonfiguration nach Schäfer; Tse et al. (2025).	LXXXV
A11.1	Vergleich der Softwareanbieter in Anlehnung an A_Beck (2022).	LXXXVI

Anhang

Dieser Anhang enthält ergänzende Informationen zur vorliegenden Forschungsarbeit und ist wie folgt gegliedert:

Kapitel der Arbeit	Inhalt	zugehöriger Anhang
Kapitel 3	Stand der Forschung	Anhang A1
Kapitel 4	Eigener Ansatz	
Abschnitt 4.1	Produktanalyse	-
Abschnitt 4.2	Systemmodellierung	Anhang A2
Abschnitt 4.3	Optimierung	Anhang A3
Abschnitt 4.4	Simulation	Anhang A4
Kapitel 5	Anwendung und Ergebnisse	Anhang A5
Abschnitt 5.1	Produktanalyse	Anhang A6
Abschnitt 5.2	Systemmodellierung	Anhang A7
Abschnitt 5.3	Optimierung	Anhang A8
Abschnitt 5.4	Simulation	Anhang A9
Abschnitt 5.5	Validierung	Anhang A10
Kapitel 6	Diskussion	Anhang A11

A1 Anhang zu Kapitel 3 – Stand der Forschung

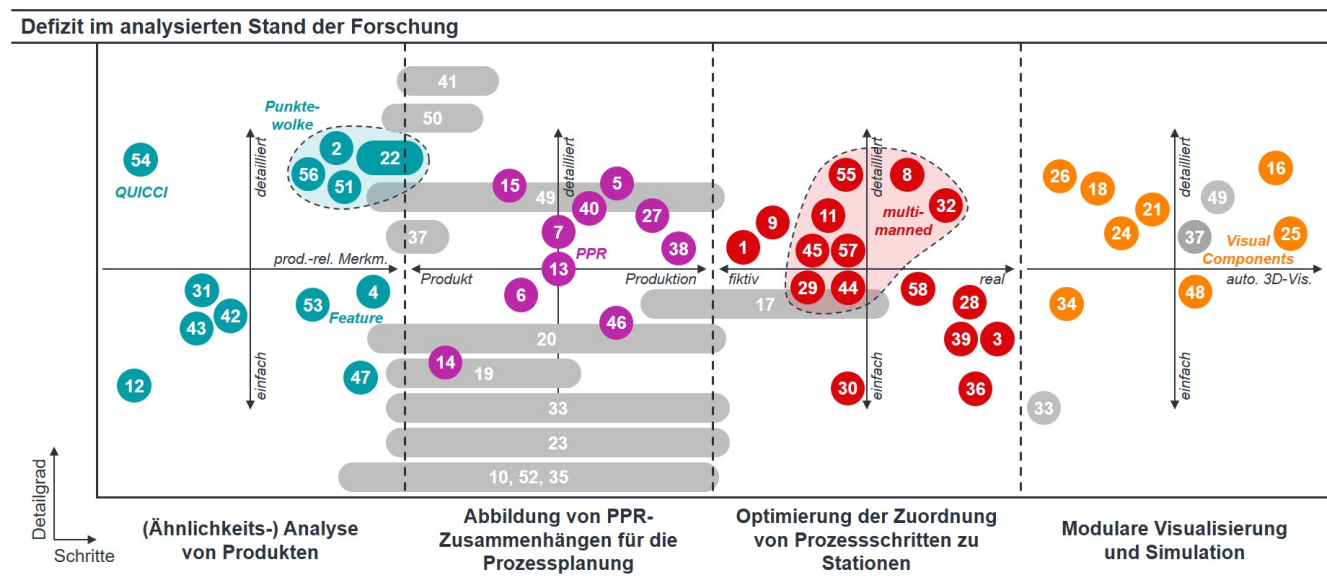


Abbildung A1.1: Visualisierung der Forschungslücke (eigene Darstellung).

Abbildung A1.1 ist entlang der vier betrachteten Aufgaben, die in Abbildung 3.1 hergeleitet werden, gegliedert. Die im Stand der Forschung (Kapitel 3) analysierten Arbeiten sind gemäß ihrer Zuordnung zu diesen Teildisziplinen eingefärbt. Der Zusammenhang zwischen dem dargestellten Index und dem zugehörigen Autor kann Abbildung A1.2 entnommen werden.

Mit dem Ziel der Visualisierung der Forschungslücke werden die Arbeiten in Abbildung A1.1 anhand von Koordinatensystemen eingeordnet. Die Ordinate stellt immer den Detailgrad der Abbildung des jeweiligen Sachverhalts durch die Literatur dar. Die Abszisse ist abhängig von der jeweiligen Aufgabe belegt. Produktionsrelevante Produktmerkmale können als die Schnittstelle zwischen Produktanalyse und Prozessplanung gesehen werden. Daher sind Arbeiten der Ähnlichkeitsanalyse von Produkten, die *produktionsrelevante Produktmerkmale* (prod.-rel. Merkm.) extrahieren, jeweils rechts eingeordnet. Bei der zweiten Aufgabe der modellbasierten Verknüpfung von Produkt und Produktion unterscheidet die Abszisse zwischen dem Fokus der Modellierung auf Produkt oder Produktionssystem. Aufgrund der starken Abstraktion des realen Problems in der Literatur des *Assembly Line Balancing* (ALB) wird bei der Optimierung der Zuordnung von Prozessschritten zu Stationen horizontal zwischen fiktiven und realen Beispielen unterschieden. Im letzten Schritt werden Arbeiten, die eine Integration des Planungsergebnisses in den weiteren Planungsprozess bspw. anhand einer *automatisierten 3D-Visualisierung* (auto. 3D-Vis.) und Simulation betrachten, weiter rechts eingeordnet. Abstrakt betrachtet können die vier Abszissen so entlang des Produktentstehungsprozesses von links nach rechts kombiniert werden. Dabei wird ersichtlich, dass kein ganzheitlicher Ansatz zur assistierten Produktionssystemplanung vorliegt.

Zusammenhang zwischen Index und AUTOR (A-Z)

1 ABDOUS ET AL. (2022)	16 GÖNNHEIMER ET AL. (2019)	31 MACHALICA ET AL. (2019)	46 SCHÄFER ET AL. (2019)
2 ACHLIOPTAS ET AL. (2017)	17 HAGEMANN (2022)	32 MICHELS ET AL. (2018)	47 SCHUH ET AL. (2014)
3 ALBUS & SEEGER (2021)	18 HENKENJOHANN ET AL. (2021)	33 MÜLLER (2008)	48 STAHR ET AL. (2020)
4 BAI ET AL. (2010)	19 HERMANN (2019)	34 MÜLLER ET AL. (2011)	49 STOLL (2017)
5 BAUER (2014)	20 JACOB ET AL. (2018)	35 MÜLLER (2018)	50 SU (2009)
6 BOSSMANN (2007)	21 KLUGE (2011)	36 NAVAS-BARRIOS ET AL. (2022)	51 SUN ET AL. (2021)
7 CADET ET AL. (2017)	22 KRAHE ET AL. (2022)	37 NEB & BAUERNHANS (2021)	52 TROMMER (2001)
8 CHEN ET AL. (2018)	23 KRÖLL (2007)	38 NEUHAUSEN (2001)	53 TSAI & CHANG (2005)
9 CHI ET AL. (2022)	24 KUHN ET AL. (2020)	39 NUGRAHA ET AL. (2021)	54 VAN BLOKLAND ET AL. (2021)
10 FALLBÖHMER (2000)	25 LÄMMLE ET AL. (2020)	40 OMG (2017)	55 WECKENBORG ET AL. (20)
11 FATTAHI ET AL. (2011)	26 LANDHERR (2014)	41 OU & XU (2013)	56 YANG ET AL. (2017)
12 FELDHOSEN ET AL. (2010)	27 LEMAIGNAN ET AL. (2008)	42 REA ET AL. (2002)	57 YILMAZ & YILMAZ (2020)
13 FELDMANN ET AL. (2008)	28 LI ET AL. (2022)	43 ROJ ET AL. (2021)	58 YUAN ET AL. (2015)
14 FRIEDENTHAL ET AL. (2012)	29 LOPES ET AL. (2020)	44 ROSHANI & GIGLIO (2015)	
15 GAUSEMEIER ET AL. (2012)	30 LOPES ET AL. (2021)	45 SAHIN & KELLEGÖZ (2019)	

Abbildung A1.2: Legende mit Zusammenhang zwischen Autor (alphabetisch sortiert) und dem in Abbildung A1.1 dargestellten Index.

A2 Anhang zu Kapitel 4.2 – Systemmodellierung

Tabelle A2.1: Attribute zur Beschreibung des Bohrens nach Gomeringer & Kilgus et al. (2022).

Attribut	Einheit
Vorschub	[mm/U]
Schnittgeschwindigkeit	[m/min]
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]
Drehzahl	[1/min]
realisierter Bohrdurchmesser	[mm]
Bohrtiefe	[mm]
Kühlschmierstoffzufuhr	[l/mm]
realisierter Toleranzwert	[IT]
Prozessdauer	[s]
Hauptnutzungszeit	[s]

Tabelle A2.2: Attribute zur Beschreibung des Fräsens nach Gomeringer & Kilgus et al. (2022).

Attribut	Einheit
Vorschub	[mm/U]
Schnittgeschwindigkeit	[m/min]
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]
Schnitttiefe	[mm]
Schnittbreite	[mm]
Drehzahl	[1/min]
Kühlschmierstoffzufuhr	[l/mm]
realisierter Toleranzwert	[IT]
Prozessdauer	[s]
Hauptnutzungszeit	[s]

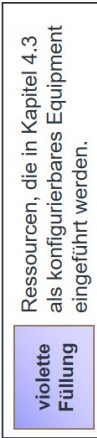


Abbildung A2.1: Ausschnitt aus der Referenzarchitektur des Produktionssystemmodells (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schenkel 2023).

A3 Anhang zu Kapitel 4.3 – Optimierung

A3.1 Assembly Line Balancing Modell

A3.1.1 Variablen und Parameter des Assembly Line Balancing Modells

Tabelle A3.1: Variablen des ALB Modells.

Variable	Beschreibung
x_{ijk}	Gibt an, welcher Anteil von Aufgabe i auf Station j vom Typ k (Schweißen $k = 1$, Laserschneiden $k = 2$, Prüfen $k = 3$) bearbeitet wird.
w_{ijk}	Gibt an, ob Aufgabe i auf Station j vom Typ k bearbeitet wird.
y_{ij}	Gibt an, ob die Bearbeitung von Aufgabe i an Station j bereits begonnen wurde.
z_{ij}	Gibt an, ob die Bearbeitung von Aufgabe i an Station j bereits abgeschlossen ist.
f_{ij}	Gibt an, ob Aufgabe i auf Station j fertiggestellt wird oder nicht.
v_{jk}	Gibt an, ob Station j vom Typ k eröffnet wird oder nicht.
s	Gibt die Anzahl eröffneter Stationen an.
l_{pj}	Gibt an, ob Teil p auf Station j zu beladen ist.
m_j^{product}	Gibt das Gesamtgewicht des Zwischenprodukts am Ende von Station j an.
o_{ij}	Gibt an, ob für Aufgabe i auf Station j ein <i>overlap</i> vorliegt (vgl. Strafterm).
t^{res}	Gibt die zur Verfügung stehende Taktzeitreserve über alle Stationen an.
α_j	Gibt an, ob an Station j zwei Roboter hat oder nicht.
β_j^H	Gibt an, ob Station j manuell beladen wird.
β_j^R	Gibt an, ob an Station j durch einen Roboter beladen wird.
γ_j^H	Gibt an, ob an Station j die Übergabe der Zwischenprodukte an die nächste Station von einem Menschen übernommen wird oder nicht.
γ_j^R	Gibt an, ob an Station j die Übergabe der Zwischenprodukte an die nächste Station von einem Roboter übernommen wird oder nicht.
δ_j	Gibt an, ob an Station j ein Drehtisch (TC) zur Verfügung steht oder nicht.

Tabelle A3.2: Parameter des ALB Modells.

Variable	Beschreibung
P_{mn}	<i>Precedence Matrix</i> , die die Vorrangbeziehungen zwischen den Aufgaben enthält Eintrag 1, falls m vor n , sonst 0.
F_{ik}	<i>Feasibility Matrix</i> , die angibt, ob Aufgabe i auf Stationstyp k bearbeitet werden muss Eintrag 1, falls Aufgabe i Stationstyp k verlangt, sonst 0.
$L_{ip_1p_2}$	<i>Link Matrix</i> , die angibt, ob Aufgabe i eine Verbindung zwischen den Teilen 1 und 2 herstellt oder nicht.
N_{ip}	Matrix, die für alle Aufgaben i angibt, welche Teile p zu deren Bearbeitung benötigt werden. Eintrag 1, falls Aufgabe i Teil p benötigt, sonst 0.
m_{limit}	Maximale für die manuelle Handhabung zulässige Gesamtmasse.
m_p	Masse des Teils p .
p_i	Anzahl neu zu beladender Teile für Aufgabe i .
c_t	Maximal zulässige Zykluszeit (Kudentakt).
t_i	Benötigte Gesamtbearbeitungszeit für Aufgabe i (bei <i>einem</i> Roboter).
t^o	Zeit (Strafterm), die für eine <i>overlap</i> benötigt wird.
t^{pos}	Positionierzeit eines Roboters.
t^{turn}	Drehzeit des Drehtischs (TC).
$t^{\text{out,R}}$	Transferzeit bei Entnahme des Zwischenprodukts durch einen Roboter.
$t^{\text{out,H}}$	Transferzeit bei Entnahme des Zwischenprodukts durch einen Menschen.
t_{in, R_p}	Beladezeit für Teil p bei Handhabung mit einem Roboter.
t_{in, H_p}	Beladezeit für Teil p bei Handhabung mit einem Menschen.
x_i^{min}	Kleinstmöglicher Bearbeitungsanteil einer Aufgabe i auf einer einzelnen Station.
c_{base}	Basiskosten einer Station (analog Basisfläche a_{base}).
c_{addRobot}	Zusatzkosten eines Bearbeitungsroboters (analog Zusatzfläche a_{addRobot}).
c_{handIR}	Zusatzkosten eines Handhabungsroboters (analog Zusatzfläche a_{handIR}).
c_{handIH}	Zusatzkosten bei manueller Handhabung (analog Zusatzfläche a_{handIH}).
c_{addTC}	Zusatzkosten einer Turntable Cell (analog Zusatzfläche a_{addTC}).
M	Hinreichend große Zahl (Teil der sog. Big-M-Formulierung).

A3.1.2 Mathematische Formulierung der Constraints des Assembly Line Balancing Modells

– Formulierung in Anlehnung an Schäfer & Tse et al. (2025) siehe nächste Seite –

$$\begin{aligned}
& \text{s.t.} \quad \sum_{j \in J} x_{ijk} \\
& x_{ijk} \\
& w_{ijk} \\
& o_{ij} \\
& o_{ij} \\
& o_{ij} \\
& o_{ij} \\
& x_{ijk} \\
& \sum_{i \in I} x_{ijk} \\
& \sum_{k \in K} v_{jk} \\
& \sum_{k \in K} v_{(j+1)k} \\
& v_{jk} \\
& y_{nj} \cdot P_{mn} \\
& \sum_{h=1}^j \sum_{k \in K} x_{ihk} \\
& y_{ij} \\
& z_{ij} \\
& 1 - z_{ij} \\
& l_{p1} \\
& l_{pj} \\
& l_{pj}
\end{aligned}$$

$$= F_{ik} \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (1)$$

$$\leq w_{ijk} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (2)$$

$$\leq x_{ijk} \cdot M \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\geq w_{ij1} - \sum_{h=1}^j x_{ih1} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4)$$

$$\leq x_{ij1} \cdot M \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (5)$$

$$\leq (1 - \sum_{h=1}^j x_{ih1}) \cdot M \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (6)$$

$$\leq 1 - w_{ijk} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \setminus \{1\} \quad (7)$$

$$\geq x_i^{\min} \cdot w_{ijk} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (8)$$

$$\leq v_{jk} \cdot M \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (9)$$

$$\leq 1 \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$\leq \sum_{k \in K} v_{jk} \quad \forall j \in J \quad (11)$$

$$\leq \sum_{i \in I} w_{ijk} \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (12)$$

$$\leq z_{mj} \quad \forall m, n \in I, \forall j \in J \quad (13)$$

$$\leq y_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (14)$$

$$\leq M \cdot \sum_{h=1}^j \sum_{k \in K} x_{ihk} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (15)$$

$$\leq \sum_{h=1}^{j-1} \sum_{k \in K} x_{ihk} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (16)$$

$$\leq M \cdot (1 - \sum_{h=1}^{j-1} \sum_{k \in K} x_{ihk}) \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (17)$$

$$\geq w_{i11} \cdot N_{ip} \quad \forall i \in I, \forall p \in P \quad (18)$$

$$\geq w_{ij1} \cdot N_{ip} - \sum_{h=1}^{j-1} l_{ph} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \setminus \{1\}, \forall p \in P \quad (19)$$

$$\leq \sum_{i \in I} (w_{ij1} \cdot N_{ip}) \quad \forall p \in P, \forall j \in J \quad (20)$$

$$\text{s.t.} \quad t^{\text{out},R} + \sum_{p \in P} l_{pj} \cdot t_p^{\text{in},R} + t^{\text{turn}} + t^{\text{res}} \leq c_t + (3 - \beta_j^R - \gamma_j^R - \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J \quad (21)$$

$$t^{\text{out},H} + \sum_{p \in P} l_{pj} \cdot t_p^{\text{in},H} + t^{\text{turn}} + t^{\text{res}} \leq c_t + (1 + \beta_j^R + \gamma_j^R - \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J \quad (22)$$

$$t^{\text{out},H} + \sum_{p \in P} l_{pj} \cdot t_p^{\text{in},R} + t^{\text{turn}} + t^{\text{res}} \leq c_t + (2 - \beta_j^R + \gamma_j^R - \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J \quad (23)$$

$$t^{\text{out},R} + \sum_{p \in P} l_{pj} \cdot t_p^{\text{in},H} + t^{\text{turn}} + t^{\text{res}} \leq c_t + (2 + \beta_j^R - \gamma_j^R - \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J \quad (24)$$

$$\sum_{i \in I} \left(\sum_{q \in \{1,2\}} (t^{\text{pos}} \cdot w_{ijq}) + t_i \cdot x_{ijk} + t^0 \cdot o_{ij} \right) + t^{\text{turn}} + t^{\text{res}} \leq c_t + (1 + \alpha_j - \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (25)$$

$$\sum_{i \in I} \left(\sum_{q \in \{1,2\}} (t^{\text{pos}} \cdot w_{ijq}) + \frac{1}{2} \cdot t_i \cdot x_{ijk} + t^0 \cdot o_{ij} \right) + t^{\text{turn}} + t^{\text{res}} \leq c_t + (2 - \alpha_j - \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (26)$$

$$t^{\text{out},R} + \sum_{p \in P} l_{pj} \cdot t_p^{\text{in},R} + \sum_{i \in I} \left(\sum_{q \in \{1,2\}} (t^{\text{pos}} \cdot w_{ijq}) + t_i \cdot x_{ijk} + t^0 \cdot o_{ij} \right) + t^{\text{res}} \leq c_t + (2 + \alpha_j - \beta_j^R - \gamma_j^R + \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (27)$$

$$t^{\text{out},H} + \sum_{p \in P} l_{pj} \cdot t_p^{\text{in},R} + \sum_{i \in I} \left(\sum_{q \in \{1,2\}} (t^{\text{pos}} \cdot w_{ijq}) + t_i \cdot x_{ijk} + t^0 \cdot o_{ij} \right) + t^{\text{res}} \leq c_t + (1 + \alpha_j - \beta_j^R + \gamma_j^R + \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (28)$$

$$t^{\text{out},R} + \sum_{p \in P} l_{pj} \cdot t_p^{\text{in},R} + \sum_{i \in I} \left(\sum_{q \in \{1,2\}} (t^{\text{pos}} \cdot w_{ijq}) + \frac{1}{2} \cdot t_i \cdot x_{ijk} + t^0 \cdot o_{ij} \right) + t^{\text{res}} \leq c_t + (3 - \alpha_j - \beta_j^R - \gamma_j^R + \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (29)$$

$$t^{\text{out},H} + \sum_{p \in P} l_{pj} \cdot t_p^{\text{in},R} + \sum_{i \in I} \left(\sum_{q \in \{1,2\}} (t^{\text{pos}} \cdot w_{ijq}) + \frac{1}{2} \cdot t_i \cdot x_{ijk} + t^0 \cdot o_{ij} \right) + t^{\text{res}} \leq c_t + (2 - \alpha_j - \beta_j^R + \gamma_j^R + \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (30)$$

$$t^{\text{out},R} + \sum_{p \in P} l_{pj} \cdot t_p^{\text{in},H} + \sum_{i \in I} \left(\sum_{q \in \{1,2\}} (t^{\text{pos}} \cdot w_{ijq}) + t_i \cdot x_{ijk} + t^0 \cdot o_{ij} \right) + t^{\text{res}} \leq c_t + (1 + \alpha_j + \beta_j^R - \gamma_j^R + \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (31)$$

$$t^{\text{out},H} + \sum_{p \in P} l_{pj} \cdot t_p^{\text{in},H} + \sum_{i \in I} \left(\sum_{q \in \{1,2\}} (t^{\text{pos}} \cdot w_{ijq}) + t_i \cdot x_{ijk} + t^0 \cdot o_{ij} \right) + t^{\text{res}} \leq c_t + (\alpha_j + \beta_j^R + \gamma_j^R + \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (32)$$

$$t^{\text{out},R} + \sum_{p \in P} l_{pj} \cdot t_p^{\text{in},H} + \sum_{i \in I} \left(\sum_{q \in \{1,2\}} (t^{\text{pos}} \cdot w_{ijq}) + \frac{1}{2} \cdot t_i \cdot x_{ijk} + t^0 \cdot o_{ij} \right) + t^{\text{res}} \leq c_t + (2 - \alpha_j + \beta_j^R - \gamma_j^R + \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (33)$$

$$t^{\text{out},H} + \sum_{p \in P} l_{pj} \cdot t_p^{\text{in},H} + \sum_{i \in I} \left(\sum_{q \in \{1,2\}} (t^{\text{pos}} \cdot w_{ijq}) + \frac{1}{2} \cdot t_i \cdot x_{ijk} + t^0 \cdot o_{ij} \right) + t^{\text{res}} \leq c_t + (1 - \alpha_j + \beta_j^R + \gamma_j^R + \delta_j) \cdot M \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (34)$$

$$m_p \cdot l_{pj} \leq m_{\text{limit}} + M \cdot \beta_j^R \quad \forall j \in J, \forall p \in P \quad (35)$$

$$m_j^{\text{product}} = \sum_{h=1}^j \sum_{p \in P} m_p \cdot l_{pj} \quad \forall j \in J \quad (36)$$

$$m_j^{\text{product}} \leq m_{\text{limit}} + M \cdot (1 + \gamma_j^R - v_{jk}) \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (37)$$

$$s = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} v_{jk} \quad (38)$$

$$f_{ij} \leq \sum_{h=1}^j \sum_{k \in K} x_{ihk} \quad \forall i \in I^{\text{crit}}, \forall j \in J \quad (39)$$

$$\begin{aligned}
\text{s.t. } & f_{ij} \\
& \sum_{j \in J} f_{ij} \\
& \alpha_j, \beta_j^R, \beta_j^H, \gamma_j^R, \gamma_j^H, \delta_j \\
& \alpha_j \\
& \beta_j^R, \beta_j^H \\
& \beta_j^R + \beta_j^H \\
& \gamma_j^R + \gamma_j^H \\
& v_{j1} \\
& v_{jk} \\
& x_{ijk} \\
& x_{ijk} \\
& x_{ijk} \\
& o_{ij}, y_{ij}, z_{ij} \\
& f_{ij} \\
& \alpha_{jk}, \beta_{jk}, \gamma_{jk}, \delta_{jk}, v_{jk} \\
& l_{pj} \\
& w_{ijk} \\
& t^{\text{res}} \\
& s \\
& m_j^{\text{product}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \leq \sum_{k \in K} w_{ijk} \\
& = 1 \\
& \leq \sum_{k \in K} v_{jk} \\
& \leq 1 - v_{j3} \\
& \leq 1 - v_{jk} \\
& \leq 1 \\
& \leq 1 \\
& \leq \beta_j^R + \beta_j^H \\
& \leq \gamma_j^R + \gamma_j^H \\
& \geq 0 \\
& \leq 1 \\
& \in \mathbb{R} \\
& \in \{0, 1\} \\
& \in \{0, 1\} \\
& \in \{0, 1\} \\
& \in \{0, 1\} \\
& \in \{0, 1\} \\
& \in \mathbb{R} \\
& \in \mathbb{N}_0 \\
& \in \mathbb{R}_0^+
\end{aligned}$$

$$\forall i \in I^{\text{crit}}, \forall j \in J \quad (40)$$

$$\forall i \in I^{\text{crit}} \quad (41)$$

$$\forall j \in J \quad (42)$$

$$\forall j \in J \quad (43_\alpha)$$

$$\forall j \in J, \forall k \in K \setminus \{1\} \quad (43_\beta)$$

$$\forall j \in J \quad (44_\beta)$$

$$\forall j \in J \quad (44_\gamma)$$

$$\forall j \in J \quad (45_\beta)$$

$$\forall j \in J, \forall k \in K \quad (45_\gamma)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (46)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (47)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (48)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J \quad (49)$$

$$\forall i \in I^{\text{crit}}, \forall j \in J \quad (50)$$

$$\forall j \in J, \forall k \in K \quad (51)$$

$$\forall p \in P, \forall j \in J \quad (52)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (53)$$

$$\quad (54)$$

$$\quad (55)$$

$$\quad (56)$$

A3.1.3 Textuelle Beschreibung aller Constraints des Assembly Line Balancing Modells

Kurzbeschreibung nach A_Schneider (2023) in der Reihenfolge aus Anhang A3.1.2:

1. Alle Aufgaben müssen vollständig bearbeitet werden. Dabei dürfen sämtliche Aufgaben i nur auf dafür geeigneten Stationen j (Zusammenhang F_{ik}), durchgeführt werden.
2. Synchronisierung w_{ijk} : Gibt an, ob Aufgabe i auf Station j vom Typ k bearbeitet wird. w_{ijk} muss folglich genau dann 1 sein, wenn $x_{ijk} > 0$.
3. Synchronisierung w_{ijk} : Muss genau dann 0 sein, wenn $x_{ijk} = 0$.
4. Synchronisierung o_{ij} : Es liegt ein *overlap* vor, wenn Aufgabe i auf Station j mit $k = 1$ bearbeitet wird und Aufgabe i auf der Station j noch nicht abgeschlossen ist.
5. Synchronisierung o_{ij} : Es liegt kein *overlap* vor, wenn $x_{ij,1} = 0$.
6. Synchronisierung o_{ij} : Wird auf den Wert 0 fixiert, wenn die Bearbeitung von Aufgabe i vollständig abgeschlossen ist.
7. Synchronisierung o_{ij} : Für $k = 2$ und $k = 3$ gilt $o_{ij} = 0$.
8. Aufgaben mit $k = 1$ können unter Einhaltung einer Mindestdauer aufgeteilt werden (beispielsweise $x_{i,min} = 15\%$ der Gesamtdauer). Aufgaben anderer Typen k können nicht aufgeteilt werden ($x_{i,min} = 1$). Diese Constraint wird deaktiviert, wenn Aufgabe i auf Station j nicht bearbeitet wird ($w_{ij} = 0$).
9. Wird eine Aufgabe i eines bestimmten Typs k an einer Station j ausgeführt, muss diese Station j vom passenden Typ k eröffnet sein.
10. Je Station j kann genau ein Stationstyp k vorliegen.
11. Eröffne Stationen ausschließlich zusammenhängend und von Station 1 beginnend.
12. Eine Station j darf nur dann eröffnet werden, wenn auch mindestens eine Aufgabe i auf dieser Station bearbeitet wird.
13. Falls die Vorrangbeziehung m vor n gilt ($P_{mn} = 1$), darf n erst begonnen werden, wenn m vollständig bearbeitet ist.
14. Synchronisierung y_{ij} : y_{ij} muss 1 sein, sobald an dieser oder einer vorherigen Station $x_{ijk} > 0$ gilt.
15. Synchronisierung y_{ij} : y_{ij} muss 0 sein, solange an dieser und allen vorherigen Stationen $x_{ijk} = 0$ gilt.
16. Synchronisierung z_{ij} : z_{ij} muss 0 sein, solange die Aufgabe i an dieser Station j noch nicht vollständig bearbeitet ist (rechte Seite kleiner 1).
17. Synchronisierung z_{ij} : z_{ij} muss 1 sein, sobald die Aufgabe i an dieser Station j bereits vollständig bearbeitet ist (rechte Seite gleich 1).
18. Auf Station 1 werden alle Teile beladen, die zur Bearbeitung einer Aufgabe i auf Station 1 benötigt werden.

19. Auf allen nachfolgenden Stationen werden die Teile beladen, die zur Bearbeitung einer Aufgabe i auf dieser Station j benötigt werden und noch nicht auf einer der vorigen Stationen beladen wurden.
20. Auf allen Stationen dürfen lediglich Teile beladen werden, die auch unmittelbar auf dieser Station verwendet werden.
21. - 24. An allen Stationen j , die über einen Drehtisch verfügen, gilt: Die Summe aus der Handhabungszeit für das Entnehmen des zuvor bearbeiteten Bauteils (entweder per Roboter oder Mensch) sowie das Einlegen der zu beladenden Teile (ebenfalls entweder per Roboter oder Mensch) und der Drehzeit darf die Zykluszeit nicht überschreiten. Die vier Ungleichungen stellen die Kombinationen aus Entnahme sowie Beladen jeweils per Roboter oder Mensch dar. Mithilfe der Big-M-Formulierung können die drei nicht zutreffenden Constraints deaktiviert werden, während an jeder Station mit Drehtisch genau eine Constraint greift.
25. - 26. An allen Stationen j , die über einen Drehtisch verfügen, gilt: Die Summe aus Positionierzeit, Bearbeitungsdauer, *overlap*-Zeit und Drehzeit darf die Zykluszeit nicht überschreiten. Stehen zwei Roboter zur Verfügung, halbiert sich die Bearbeitungsdauer bei $k = 1$ und $k = 2$. Bei $k = 3$ ist eine Halbierung der Arbeitszeit nicht möglich, was durch Constraint 42_α sichergestellt ist ($\alpha_j = 0$ an diesen Stationen).
27. - 34. An allen Stationen j , die über keinen Drehtisch verfügen, gilt: Die Summe aus Handhabungszeit für das Entnehmen des zuvor bearbeiteten Bauteils (entweder per Roboter oder Mensch), das Einlegen der zu beladenden Teile (ebenfalls per Roboter oder Mensch), Positionierzeit, Bearbeitungsdauer und Zeit für das Schweißen der Überlappungen darf die Zykluszeit nicht überschreiten. Die acht Ungleichungen ($2^3 = 8$) stellen die Kombinationen aus Entnahme sowie Beladen jeweils per Roboter oder Mensch und der Anzahl der Roboter (ein oder zwei) dar. Mithilfe der Big-M-Formulierung können die sieben nicht zutreffenden Constraints deaktiviert werden, während an jeder Station ohne Drehtisch genau eine Constraint greift. Bei $k = 3$ ist eine Halbierung der Arbeitszeit nicht möglich, was durch Constraint 42_α sichergestellt ist ($\alpha_j = 0$ an diesen Stationen).
35. Übersteigt die Masse m_p eines Teils p das maximal zulässige Gewicht bei manueller Handhabung m_{limit} , so muss ein Handhabungsroboter verwendet werden. Die Constraint erzwingt in diesem Fall $\beta_j^R = 1$.
36. Die Gesamtmasse des Zwischenprodukts am Ende einer Station ist gleich der Summe der Massen aller Teile, die auf dieser oder einer der vorigen Stationen beladen wurden.
37. Bei der Übergabe des Produkts zwischen Stationen ist bei manueller Handhabung das ergonomisch zulässige Maximalgewicht (m_{limit}) zu beachten. Wird an Station j die Übergabe des Produkts von einem Menschen durchgeführt ($\gamma_j^R = 0$), darf das Gesamtgewicht des Zwischenprodukts m_{limit} nicht überschreiten. Die Constraint wird per

Big-M-Formulierung deaktiviert, falls die Handhabung durch einen Roboter vorgenommen wird ($\gamma_j^R = 1$) oder falls Station j nicht eröffnet ist ($v_{jk} = 0$). Das Berücksichtigen der Öffnung der Station ist nötig, da das Gesamtgewicht an allen potenziellen Stationen am Ende der Linie, die nicht eröffnet werden, groß ist. An diesen Stationen würde die Constraint ohne Deaktivierung das Errichten eines Handhabungsroboters verlangen, was jedoch im Konflikt zu Constraint 41 stünde.

38. Die Anzahl eröffneter Stationen s entspricht der Anzahl an Stationen j mit $v_{jk} = 1$.
39. Um Qualitätsanforderungen gerecht zu werden, müssen toleranzkritische Aufgaben möglichst spät fertiggestellt werden. Dazu wird die Information benötigt, auf welcher Station eine Aufgabe abschließend bearbeitet wurde (*finish*). Diese Information wird in der Entscheidungsvariable f_{ij} gespeichert. Eine Aufgabe wird auf einer Station j beendet, wenn der Gesamtbearbeitungsstand dieser Aufgabe über die aktuelle und alle vorherigen Stationen aufsummiert 1 beträgt.
40. Gleichzeitig muss die Aufgabe auf der Station j noch bearbeitet werden. Ohne diese Constraint wäre es möglich, f_{ij} an einer nachfolgenden Station auf den Wert 1 zu setzen, da der Gesamtbearbeitungsstand an allen Stationen nach abschließender Bearbeitung ebenfalls 1 beträgt.
41. Diese Constraint sichert zusätzlich ab, dass f_{ij} an ausschließlich einer Station den Wert 1 annehmen kann.
42. Sämtliche Konfigurationsoptionen ($\alpha_j, \beta_j^R, \beta_j^H, \gamma_j^R, \gamma_j^H, \delta_j$) stehen nur zur Verfügung, falls die entsprechende Station j eröffnet ist. Da alle Optionen mit Zusatzkosten verbunden sind, würde die optimale Lösung auch zu einer solchen Lösung führen. Das Festsetzen dieser Variablen kann jedoch die Laufzeit verkürzen.
43. Bei $k = 3$ kann die Arbeitszeit durch zusätzliche Roboter nicht halbiert werden ($\alpha_j = 0$). Außerdem wird für $k = 2$ und $k = 3$ kein Handhabungsroboter zum Einlegen von zusätzlichen Anbauteilen benötigt ($\beta_j^R, \beta_j^H = 0$).
44. Weder das Beladen der Teile noch der Transfer der Zwischenprodukte kann von Mensch und Roboter gleichzeitig vorgenommen werden. Pro Station ist nur eine Variante zulässig.
45. Wenn eine Station j vom Typ k eröffnet werden soll, muss entweder ein Mensch oder ein Roboter für das Beladen der Anbauteile zur Verfügung stehen. Genauso muss an jeder Station unabhängig vom Stationstyp ein Mensch oder ein Roboter für den Transfer der Zwischenprodukte zur Verfügung stehen.
46. - 56. Geben die zulässigen Wertebereiche aller Variablen an.

A3.2 Assembly Line Balancing Erweiterungsmodell

A3.2.1 Variablen des Erweiterungsmodells

Tabelle A3.3: Variablen des Erweiterungsmodells.

Variable	Beschreibung
$c_{p_1 p_2 j}$	Gibt die Anzahl an bereits realisierten Verbindungen zwischen Teil 1 und Teil 2 auf Station j an.
$cb_{p_1 p_2 j}$	Gibt an, ob mindestens eine Verbindung zwischen Teil 1 und Teil 2 auf Station j besteht oder nicht.
$col_{p_1 j c}$	Gibt an, ob Teil 1 auf Station j Farbe c besitzt oder nicht.
$ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j}$	Gibt an, ob Teil 1, Teil 2, Farbe c_o und Farbe c_n auf Station j eine sog. <i>color changing part combination</i> (CCPC) darstellen oder nicht.
$change_{c_o c_n j}$	Gibt an, ob auf Station j ein Farbwechsel von c_o zu c_n stattfindet oder nicht.
$cpc_{p j c_o c_n}$	Gibt an, ob auf Station j für Teil p ein Farbwechsel von c_o zu c_n stattfindet oder nicht (<i>change part color</i>).
$lpc_{p j c}$	Gibt an, ob Teil p mit Farbe c auf Station j bereits beladen wurde oder nicht.
$ec_{c j}$	Gibt an, ob mindestens ein beladenes Teil auf Station j Farbe c besitzt oder nicht.
s_j	Gibt die Anzahl verschiedener Farben (und damit unverbundener Subteile) auf Station j an.

A3.2.2 Mathematische Formulierung der Constraints des Erweiterungsmodells

– Formulierung in Anlehnung an A_Schneider (2023) siehe nächste Seite –

$$\begin{aligned}
\text{s.t. } c_{p_1 p_2 j} &= \sum_{i \in I} w_{ij1} \cdot L_{ip_1 p_2} & \forall (p_1, p_2) \in P \times P, \forall j \in J & (e01) \\
cb_{p_1 p_2 j} &\leq \sum_{h=1}^j c_{p_1 p_2 h} & \forall (p_1, p_2) \in P \times P, \forall j \in J & (e02) \\
M \cdot cb_{p_1 p_2 j} &\geq \sum_{h=1}^j c_{p_1 p_2 h} & \forall (p_1, p_2) \in P \times P, \forall j \in J & (e03) \\
col_{p_1 j c} - col_{p_2 j c} &\leq 1 - cb_{p_1 p_2 j} & \forall (p_1, p_2) \in P \times P, \forall j \in J, \forall c \in C & (e04) \\
3 \cdot ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j} &\leq col_{p_1 c_o (j-1)} + col_{p_2 c_n (j-1)} + cb_{p_1 p_2 j} & \forall (p_1, p_2) \in P \times P, \forall (c_o, c_n) \in C \times C, \forall j \in J & (e05) \\
2 + ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j} &\geq col_{p_1 c_o (j-1)} + col_{p_2 c_n (j-1)} + cb_{p_1 p_2 j} & \forall (p_1, p_2) \in P \times P, \forall (c_o, c_n) \in C \times C : c_o < c_n, \forall j \in J & (e06) \\
ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j} &= 0 & \forall (p_1, p_2) \in P \times P, \forall (c_o, c_n) \in C \times C : c_o \geq c_n, \forall j \in J & (e07) \\
change_{c_o c_n j} &\leq \sum_{\substack{(p_1, p_2) \\ \in P \times P}} ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j} & \forall (c_o, c_n) \in C \times C, \forall j \in J & (e08) \\
M \cdot change_{c_o c_n j} &\geq \sum_{\substack{(p_1, p_2) \\ \in P \times P}} ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j} & \forall (c_o, c_n) \in C \times C, \forall j \in J & (e09) \\
col_{p j c_o} &\geq col_{p(j-1) c_o} - \sum_{c_n \in C} change_{c_o c_n j} & \forall c_o \in C, \forall p \in P, \forall j \in J & (e10) \\
cpc_{p j c_o c_n} &\leq col_{p(j-1) c_o} & \forall p \in P, \forall (c_o, c_n) \in C \times C, \forall j \in J & (e11) \\
cpc_{p j c_o c_n} &\leq change_{c_o c_n j} & \forall p \in P, \forall (c_o, c_n) \in C \times C, \forall j \in J & (e12) \\
1 + cpc_{p j c_o c_n} &\geq col_{p(j-1) c_o} + change_{c_o c_n j} & \forall p \in P, \forall (c_o, c_n) \in C \times C, \forall j \in J & (e13) \\
col_{p j c_n} &\geq \sum_{c_o \in C} cpc_{p j c_o c_n} & \forall p \in P, \forall c_n \in C, \forall j \in J & (e14) \\
col_{p j c_n} &\leq col_{p(j-1) c_n} + \sum_{c_o \in C} cpc_{p j c_o c_n} & \forall p \in P, \forall c_n \in C, \forall j \in J & (e15) \\
col_{p 0 p} &= 1 & \forall p \in P & (e16) \\
col_{p 0 c} &= 0 & \forall p \in P, \forall c \in C \setminus \{p\} & (e17) \\
2 \cdot lpc_{p j c} &\leq col_{p j c} + \sum_{h=1}^j l_{p h} & \forall p \in P, \forall c \in C, \forall j \in J & (e18) \\
1 + lpc_{p j c} &\geq col_{p j c} + \sum_{h=1}^j l_{p h} & \forall p \in P, \forall c \in C, \forall j \in J & (e19) \\
ec_{c j} &\leq \sum_{p \in P} lpc_{p j c} & \forall c \in C, \forall j \in J & (e20) \\
M \cdot ec_{c j} &\geq \sum_{p \in P} lpc_{p j c} & \forall c \in C, \forall j \in J & (e21) \\
s_j &= \sum_{c \in C} ec_{c j} - (1 - \sum_{k \in K} v_{j k}) & \forall j \in J & (e22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{s.t. } c_{p_1 p_2 j} &\in \mathbb{N}_0 \\
cb_{p_1 p_2 j} &\in \{0, 1\} \\
col_{pjc} &\in \{0, 1\} \\
ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j} &\in \{0, 1\} \\
change_{c_o c_n j} &\in \{0, 1\} \\
cpc_{pj c_o c_n} &\in \{0, 1\} \\
lpc_{pj c} &\in \{0, 1\} \\
ec_{cj} &\in \{0, 1\} \\
s_j &\in \{0, 1\}
\end{aligned}$$

$$\forall (p_1, p_2) \in P \times P, \forall j \in J \quad (e23)$$

$$\forall (p_1, p_2) \in P \times P, \forall j \in J \quad (e24)$$

$$\forall p \in P, \forall j \in J, \forall c \in C \quad (e25)$$

$$\forall (p_1, p_2) \in P \times P, \forall (c_o, c_n) \in C \times C, \forall j \in J \quad (e26)$$

$$\forall (c_o, c_n) \in C \times C, \forall j \in J \quad (e27)$$

$$\forall p \in P, \forall j \in J, \forall (c_o, c_n) \in C \times C \quad (e28)$$

$$\forall p \in P, \forall j \in J, \forall c \in C \quad (e29)$$

$$\forall c \in C, \forall j \in J \quad (e30)$$

$$\forall j \in J \quad (e31)$$

A3.2.3 Textuelle Beschreibung aller Constraints des Erweiterungsmodells

Kurzbeschreibung nach A_Schneider (2023) in der Reihenfolge aus Anhang A3.2.2:

1. Zwei Teile werden gemäß w_{ik1} auf einer Station verbunden, wenn auf dieser Station eine Fügeaufgabe ($k = 1$) durchgeführt wird. Die Matrix L speichert für alle Aufgaben i , welche Teile durch die jeweilige Aufgabe i miteinander verbunden werden. Werden zwei Teile miteinander verbunden, ist $c_{p_1 p_2 j} \geq 1$ (abhängig von der Anzahl der Verbindungen auf Station j), sonst 0.
2. Die binäre Variable $cb_{p_1 p_2 j}$ (*connected binary*), gibt an, ob zwei Teile p_1 und p_2 auf Station j oder einer vorherigen Station verbunden wurden ($cb_{p_1 p_2 j} = 1$) oder nicht ($cb_{p_1 p_2 j} = 0$). $cb_{p_1 p_2 j}$ darf nur den Wert 1 annehmen, wenn eine solche Verbindung auf dieser oder einer vorherigen Station hergestellt wurde.
3. $cb_{p_1 p_2 j}$ muss zugleich den Wert 1 annehmen, wenn eine solche Verbindung auf dieser oder einer vorherigen Station hergestellt wurde.
4. Die Farbcodierung zweier Teile darf nur dann identisch sein, wenn diese auch bereits verbunden wurden. Die linke Seite der Ungleichung wird im Falle gleicher Farbcodierung zweier Teile 0, was nur zulässig ist, wenn $cb_{p_1 p_2 j} = 1$ gilt.
5. Eine *color changing part combination* (CCPC) ($ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j}$) liegt vor, wenn Teil p_1 mit Farbe c_o auf Station j und Teil p_2 mit Farbe c_n verbunden werden. Diese Constraint besagt, dass $ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j}$ nur dann den Wert 1 annehmen kann, wenn Teil p_1 auf der vorigen Station Farbe c_o hatte, Teil p_2 auf der vorigen Station Farbe c_n hatte und nun beide Teile verbunden sind ($cb_{p_1 p_2 j} = 1$).
6. $ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j}$ wird durch diese Constraint auf den Wert 1 gezwungen, genau dann wenn die in der vorigen Beschreibung genannten Kriterien erfüllt sind. Diese Constraint gilt allerdings nur für Farbkombinationen der Ordnungsrelation $c_o < c_n$.
7. Für alle Farbkombinationen mit $c_o \geq c_n$ wird $ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j} = 0$ gesetzt.
8. Ein Farbwechsel von Farbe c_o (*old*) auf Farbe c_n (*new*) liegt nur dann vor, wenn (mindestens) eine CCPC $ccpc_{p_1 p_2 c_o c_n j}$ existiert. Existiert eine solche CCPC, dann darf die *change*-Variable den Wert 1 annehmen.
9. Gleichzeitig *muss* die Variable $change_{c_o c_n j}$ den Wert 1 annehmen, wenn eine solche CCPC existiert.
10. Ein Teil p muss auf Station j dieselbe Farbe c_o besitzen wie auf der vorigen Station $j - 1$, außer auf Station j erfolgt ein Farbwechsel von Farbe c_o nach Farbe c_n .
11. Ein Teil p darf auf Station j seine Farbe c_o nur dann zu Farbe c_n wechseln, wenn p auf Station $j - 1$ überhaupt Farbe c_o hatte. Dementsprechend wird die *change part color* $cpc_{pj c_o c_n}$ auf 0 gezwungen, wenn dies nicht der Fall ist.

12. Ebenso darf ein Teil p auf Station j seine Farbe c_o nur dann zu Farbe c_n wechseln, wenn auf Station j ein Farbwechsel von c_o nach c_n erfolgt, also $change_{c_o c_n j} = 1$.
13. Ein Teil p muss dagegen seine Farbe von c_o nach c_n wechseln, wenn genau diese zwei Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind, also p auf Station $j - 1$ Farbe c_o besaß und auf Station j ein Farbwechsel von c_o nach c_n erfolgt. In diesem Fall nimmt die rechte Seite der Ungleichung den Wert 2 an und erzwingt damit $cp_{c_{pj}c_o c_n} = 1$.
14. Ein Teil p muss die (*new*) Farbe c_n annehmen, wenn die Farbe dieses Teils auf der betrachteten Station von einer beliebigen anderen Farbe c_o zu c_n gewechselt wird, also $cp_{c_{pj}c_o c_n} = 1$ ist.
15. Dagegen darf Teil p nur dann Farbe c_n annehmen, wenn es diese Farbe bereits auf der vorigen Station besessen hat oder das Teil auf dieser Station einen Farbwechsel von einer beliebigen anderen Farbe c_o zu c_n erfährt.
16. Hier werden die Anfangs-Farben der Teile auf der fiktiven Station $j = 0$ festgelegt. Die Farben sind dabei so definiert, dass für jedes Teil eine gleichnamige Farbe existiert. Somit sind die binären Farb-Variablen col_{p0c} genau dann auf den Wert 1 zu setzen, wenn $p = c$.
17. Dementsprechend werden alle anderen Farb-Variablen col_{p0c} mit $p \neq c$ auf den Wert 0 gesetzt.
18. Da nur Teile als Subteile gelten, die bereits auf einer vorigen Station beladen wurden ($l_{ph} = 1$ auf einer vorigen Station h), wird die *loaded part color* Variable lpc_{pje} eingeführt. Mithilfe dieser Variable kann sichergestellt werden, dass nur Farben von bereits beladenen Teilen mitgezählt werden, wenn die Anzahl an Subteilen bestimmt wird. Die Variable lpc_{pje} darf dementsprechend nur den Wert 1 annehmen, wenn Teil p auf dieser Station bereits beladen wurde, also für eine vorherige Station h $l_{ph} = 1$ gilt und Teil p Farbe c besitzt.
19. lpc_{pje} wird nach der gleichen Logik auf den Wert 1 gezwungen, wenn diese zwei Kriterien erfüllt sind. Dann nimmt die rechte Seite der Ungleichung den Wert 2 an, sodass $lpc_{pje} = 1$ gelten muss, um die Ungleichung zu erfüllen.
20. Die *existing color* Variable ec_{jc} enthält die Information, ob (mindestens) ein Teil p existiert, für das $lpc_{pje} = 1$ gilt.
21. Gleichzeitig muss ec_{jc} den Wert 1 annehmen, wenn für mindestens ein Teil $lpc_{pje} = 1$ gilt.
22. Um die Anzahl an unverbunden Subteilen auf einer Station j zu ermitteln, werden die existierenden Farben ec_{jc} gezählt, indem über alle Farben c summiert wird.
23. - 31. Geben die zulässigen Wertebereiche aller Variablen an.

A3.3 Greifende Taktzeit-Constraints in Abhängigkeit der Equipment-Kombination

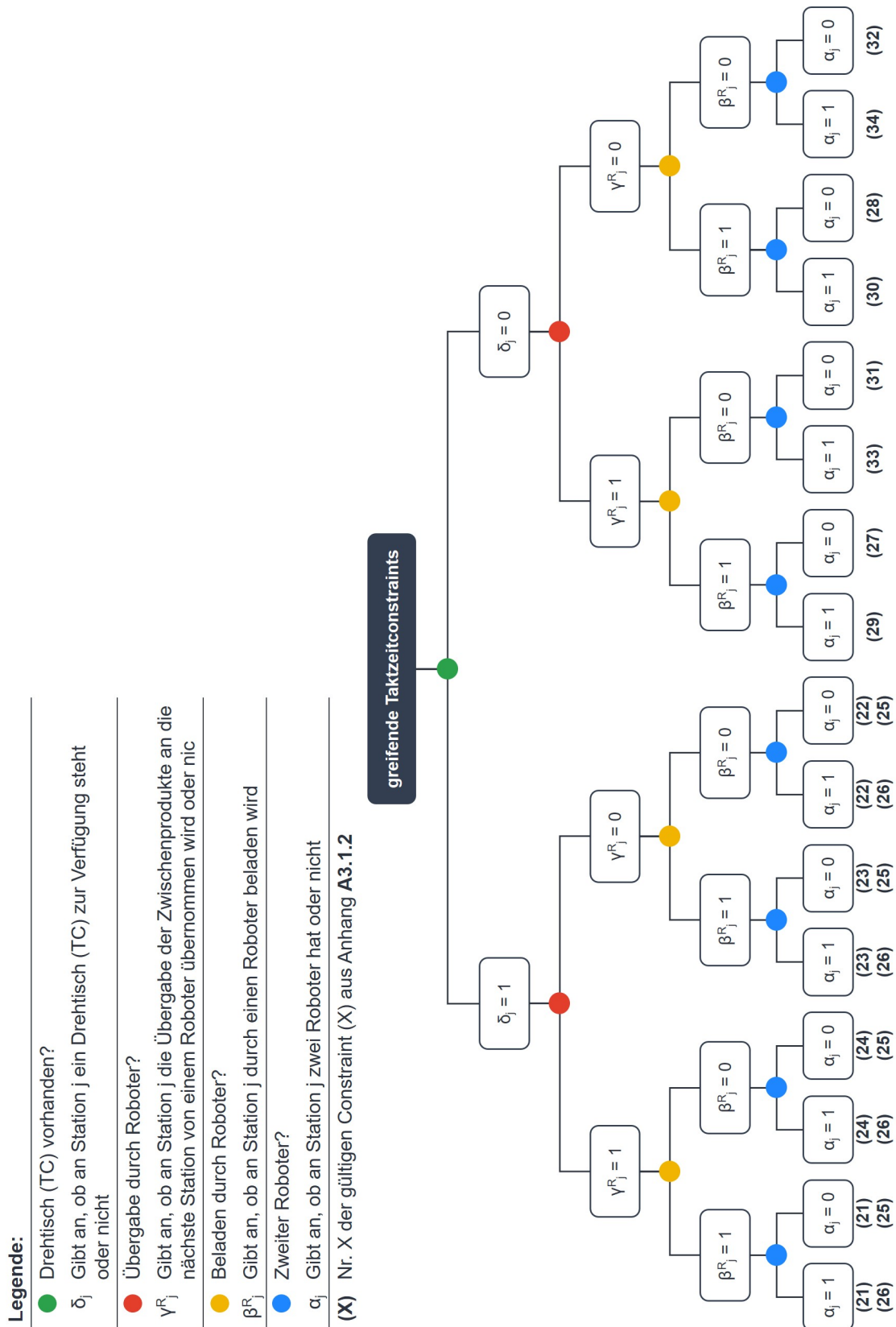


Abbildung A3.1: Auswahl der Taktzeit-Constraints anhand eines Entscheidungsbaums (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).

A4 Anhang zu Kapitel 4.4 – Simulation

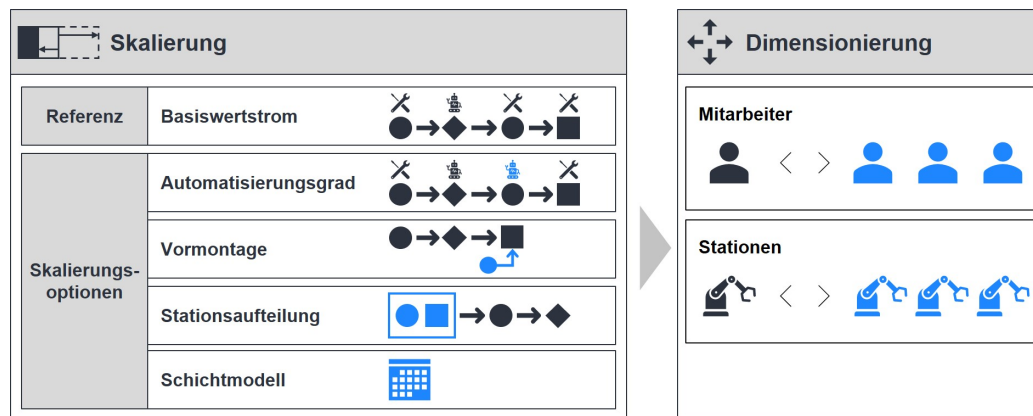


Abbildung A4.1: Skalierungsoptionen für den Hochlauf ausgehend von einem Basiswertstrom (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer & Klenk et al. 2024).

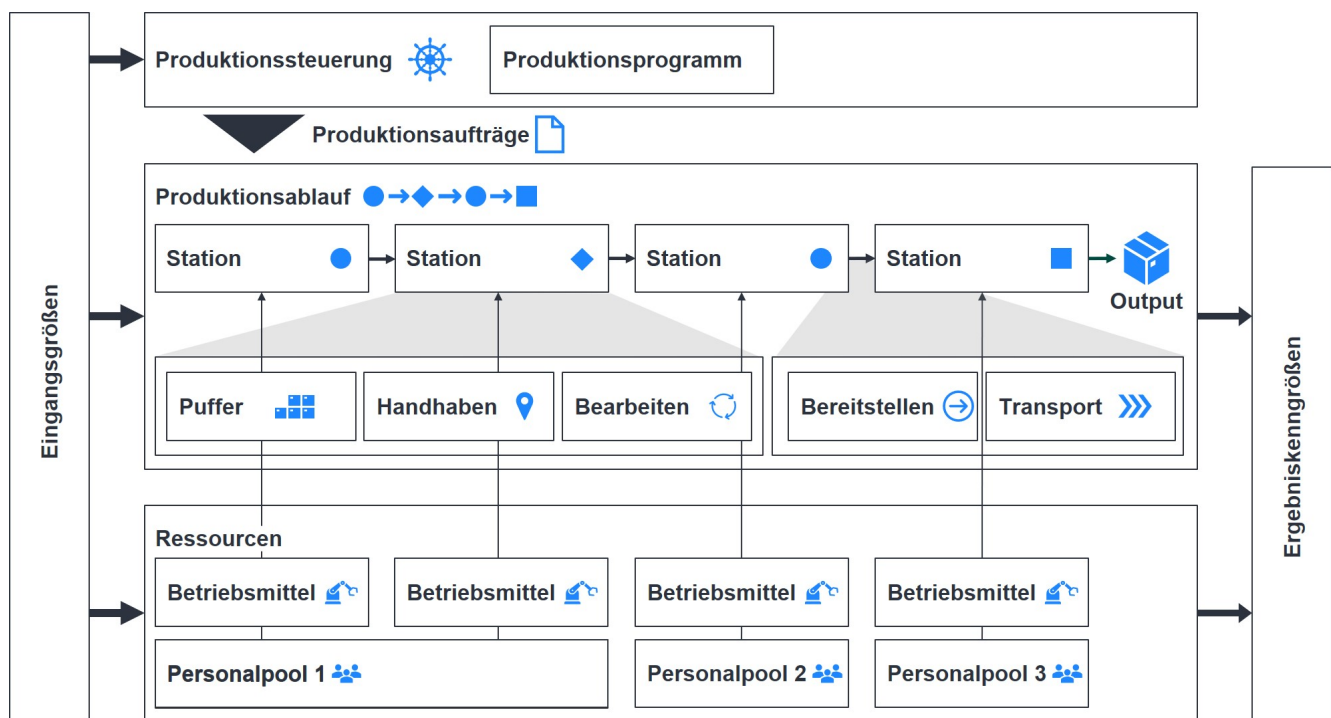


Abbildung A4.2: Struktur der Hochlaufsimulation mit AnyLogic (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer & Klenk et al. 2024).

€ Kosten	# Anzahl	Arbeitszeit	Verfügbarkeit	Qualität
<ul style="list-style-type: none"> Betriebskosten Investitionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl je Ressource (Station oder Personal) 	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl Schichten & Schichtzeiten Arbeitstage 	<ul style="list-style-type: none"> Ausfälle Wartungen Rüsten 	<ul style="list-style-type: none"> Erzielter Ausschuss

Abbildung A4.3: Variationsparameter der Ressourcen (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Zehner 2022).

A5 Anhang zu Kapitel 5 – Anwendungsfall

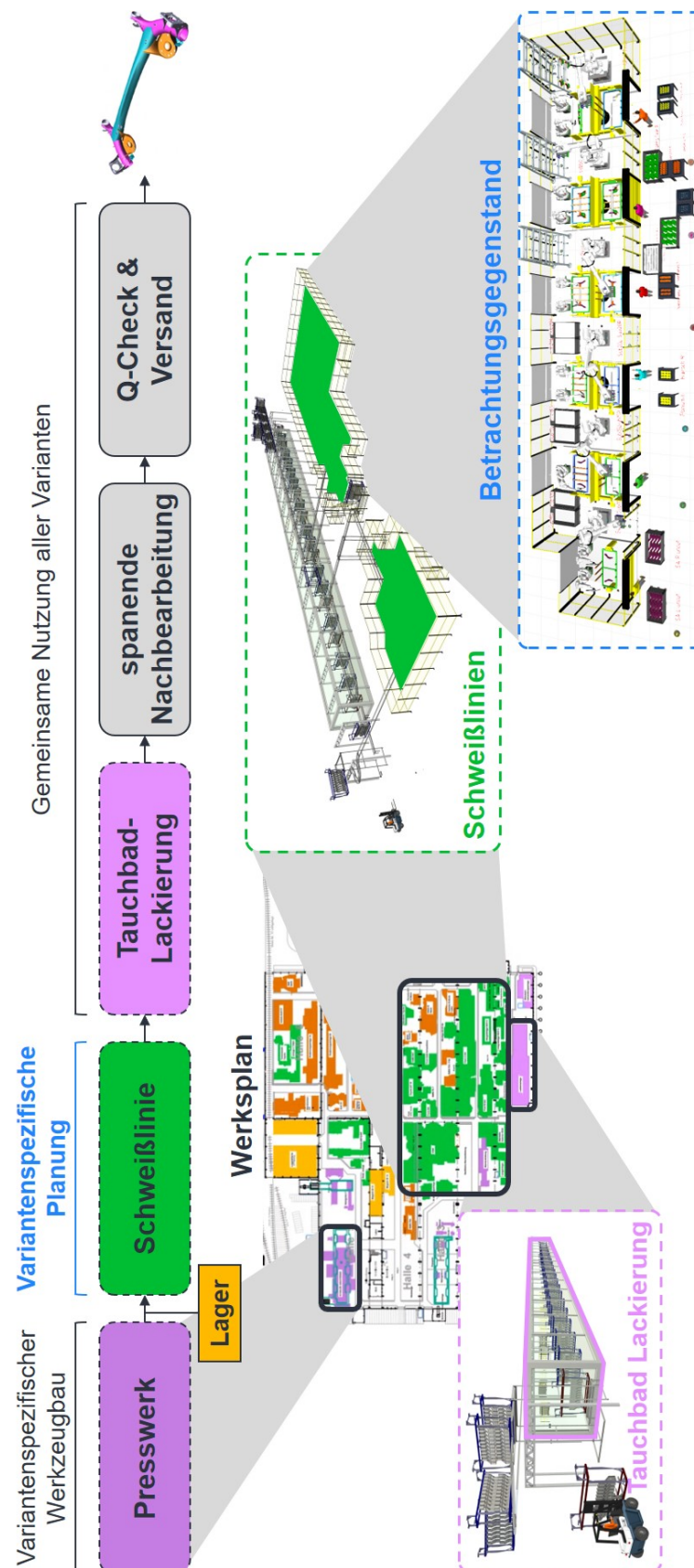


Abbildung A5.1: Betrachtungsgegenstand im Anwendungsfall (eigene Darstellung).

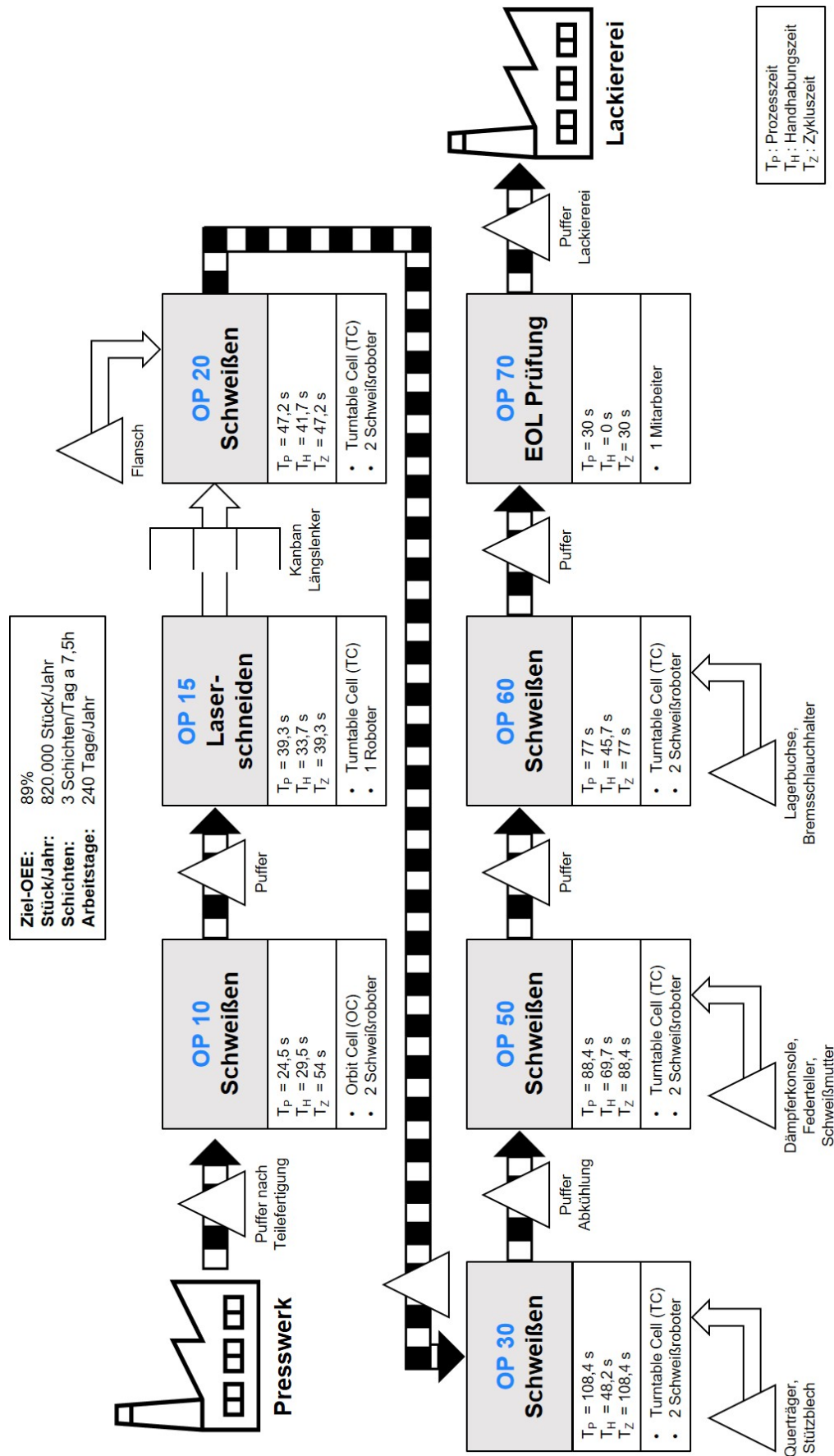


Abbildung A5.2: Wertstromanalyse des betrachteten Produktionsbereichs (eigene Darstellung).

A6 Anhang zu Kapitel 5.1 – Produktanalyse

A6.1 Analyse geometriebeschreibender Merkmale

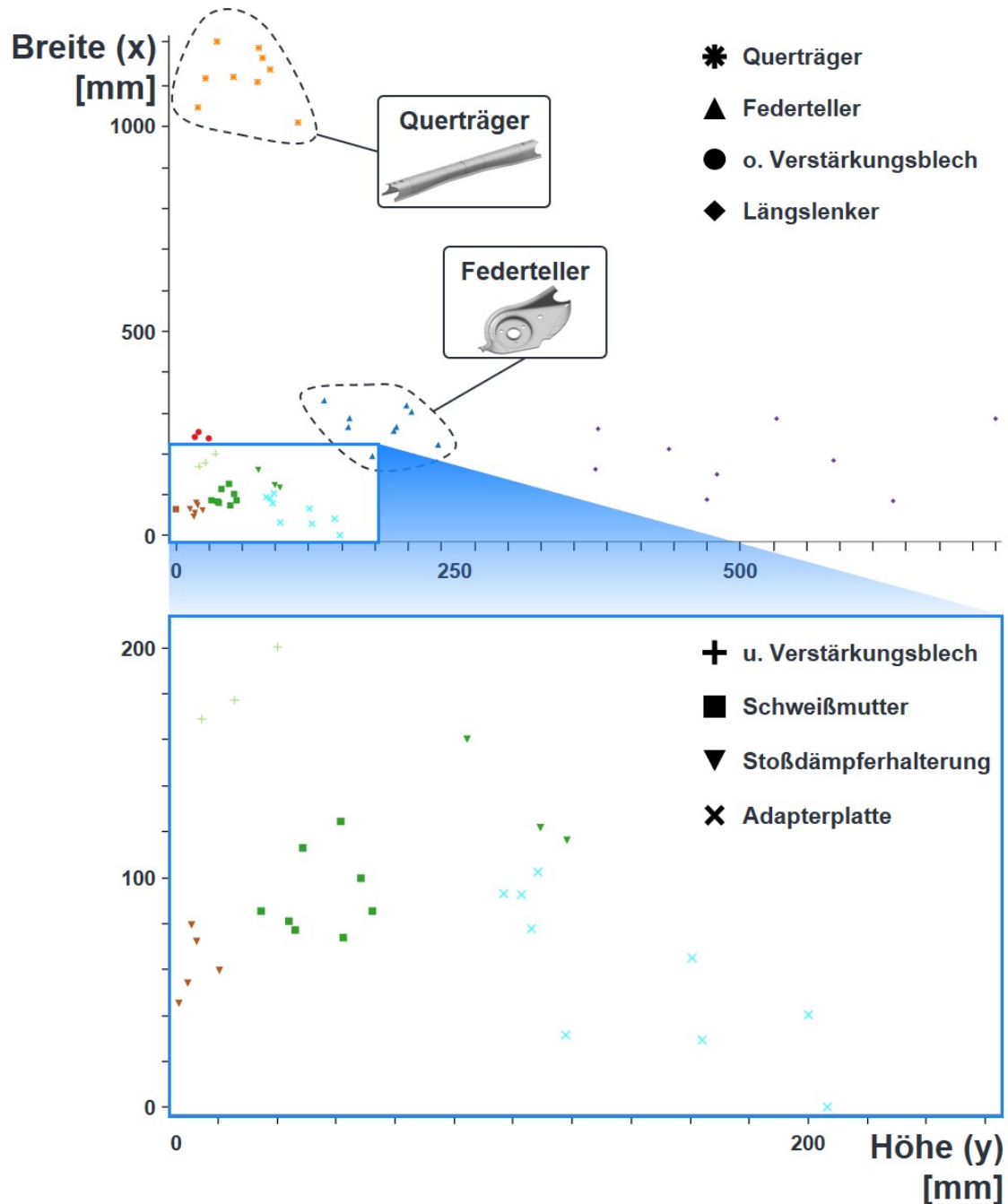


Abbildung A6.1: Clustering der Bauteile mit geometriebeschreibenden Merkmalen: Clustering Ergebnis durch Farben abgebildet (Schäfer & Treml et al. 2023).

A6.2 Autoencoder zur Analyse von Punktwolken

A6.2.1 Erzeugung der Punktwolken

```

1 def pc_flaeichenbasiert(main_path):
2     i = 0
3     for exfiles in os.walk(main_path):
4         files = exfiles[2]
5         anzahl_el = len(files) - 1
6         print(anzahl_el+1)
7         while i <= anzahl_el:
8             path = main_path + "/" + files[i]
9             name_stl = files[i].split('_')[0]
10            name = name_stl.split('.')[0]
11            x = path.split("/", 1)
12            mesh = trimesh.load(path)
13            points_faces = np.asarray(sample_pc(mesh, 4096,
point_size_factor=3))
14            points = np.vstack((points_faces))
15            point_cloud = o3d.geometry.PointCloud()
16            point_cloud.points = o3d.utility.Vector3dVector(points)
17            o3d.io.write_point_cloud(main_path + name + '.ply',
point_cloud, write_ascii=True, compressed=False)
18            i = i + 1

```

Programm Code A6.1: Flächenbasierte Umwandlung.

```

1 def pc_poisson(main_path, npoints):
2     i = 0
3     for exfiles in os.walk(main_path):
4         files = exfiles[2]
5         anzahl_el = len(files) - 1
6         while i <= anzahl_el:
7             path = main_path + "/" + files[i]
8             name_stl = files[i].split('_')[2]
9             name = name_stl.split('.')[0]
10            x = path.split("/", 1)
11            mesh = o3d.io.read_triangle_mesh(path)
12            mesh.compute_vertex_normals()
13            pc = mesh.sample_points_poisson_disk(npoints)
14            o3d.io.write_point_cloud(main_path + name + '.ply', pc,
write_ascii=True, compressed=False)
15            i = i+1

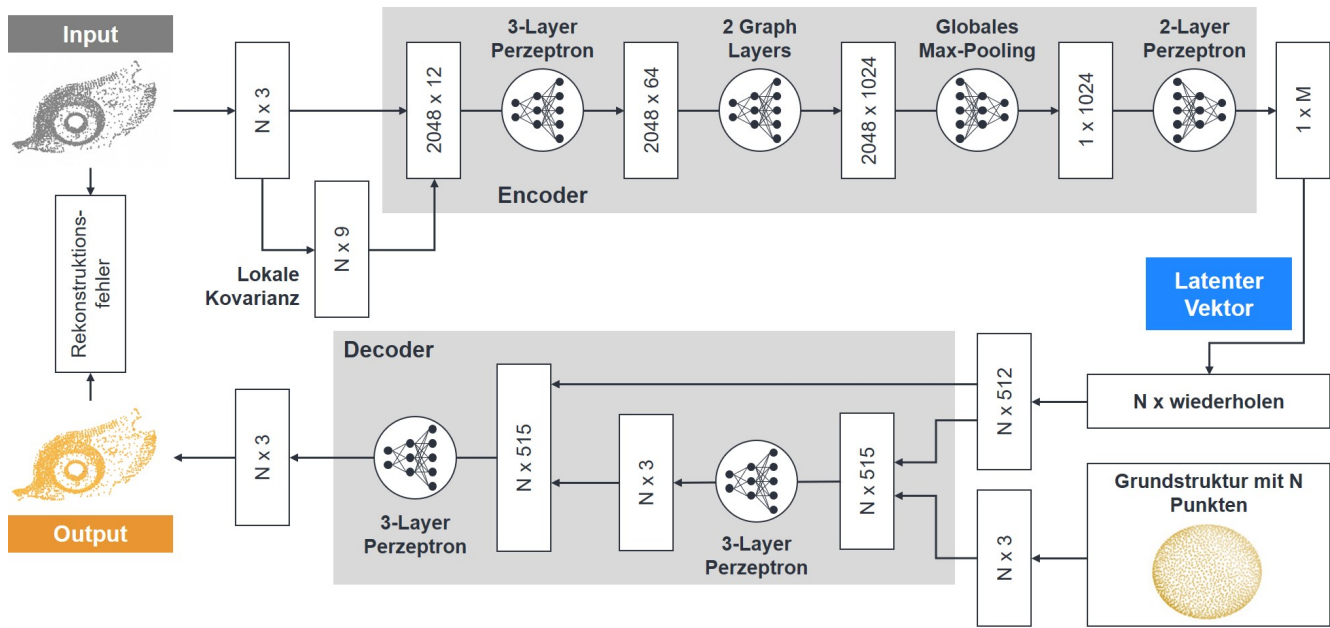
```

Programm Code A6.2: Poission-vertelte Umwandlung.

```
1 def pc_fusioniert(main_path,n_ges,n_faces):
2     i = 0
3     for exfiles in os.walk(main_path):
4         files = exfiles[2]
5         anzahl_el = len(files) - 1
6         while i <= anzahl_el:
7             path = main_path + "/" + files[i]
8             name_stl = files[i]
9             name = name_stl.split('.')[0]
10            x = path.split("/", 1)
11            mesh = trimesh.load(path)
12            vertices = np.asarray(mesh.vertices)
13            n_vertices = len(mesh.vertices)
14            if ((n_ges - n_vertices) > n_faces):
15                n_rest = n_ges - n_vertices
16                points_vertices = vertices
17                points_faces = np.asarray(sample_pc(mesh,n_rest))
18                points = np.vstack((points_vertices, points_faces))
19                point_cloud = o3d.geometry.PointCloud()
20                point_cloud.points = o3d.utility.Vector3dVector(points)
21            else:
22                n_rest = n_ges - n_faces
23                points_vertices = vertices[np.random.choice(n_vertices,
24                    n_rest, replace=False)]
25                points_faces = np.asarray(sample_pc(mesh,n_faces))
26                points = np.vstack((points_vertices, points_faces))
27                point_cloud = o3d.geometry.PointCloud()
28                point_cloud.points = o3d.utility.Vector3dVector(points)
29                o3d.io.write_point_cloud(main_path + name + '.ply',
point_cloud, write_ascii=True, compressed=False)
30            i = i + 1
```

Programm Code A6.3: Fusionierte Umwandlung.

A6.2.2 Konfiguration des Autoencoders



N = Anzahl Punkte der Punktwolke, M = Dimension (Anzahl Einträge) des latenten Vektors

Abbildung A6.2: Detaillierte Architektur des Autoencoders basierend auf Yang & Feng et al. (2017) (eigene Darstellung nach Krahe 2023).

Abbildung A6.2 zeigt die Architektur des Autoencoders entwickelt in Krahe (2023) basierend auf Yang & Feng et al. (2017). Sie setzt sich aus einem Encoder- und einem Decoder-Teil zusammen. Die Punktwolke des Bauteils stellt den Input des Autoencoders dar und besteht aus N Punkten mit jeweils drei Raumkoordinaten ($N \times 3$). Dieser hochdimensionale Input wird mit dem Encoder auf einen latenten Vektor mit M Einträgen reduziert ($1 \times M$). Im Beispiel wird $N = 2046$ und $M = 512$ gewählt. Der Decoder rekonstruiert anschließend die Punktwolke ($N \times 3$) basierend auf dem latenten Vektor ($1 \times M$) und einer Grundstruktur von N Punkten mit jeweils drei Raumkoordinaten ($N \times 3$). Mit dem errechneten Rekonstruktionsfehler, d. h. der Distanz zwischen den Koordinaten der ein- und ausgegebenen Punktwolke, werden die Gewichte der künstlichen, neuronalen Netze angepasst. Ziel ist die Minimierung des Rekonstruktionsfehlers. Für eine detaillierte Betrachtung der Schichten (engl. *layer*) der künstlichen, neuronalen Netze wird auf Yang & Feng et al. (2017) verwiesen.

A6.3 Analyse lokaler Deskriptoren

A6.3.1 Training des Dissimilarity Tree

```

1 def buildDissimilarityTree(node, descriptors):
2     if descriptors.length <= maxDescriptorsPerLeaf:
3         markAsLeafNode(node)
4         return node
5
6     counts = computeBitResponseCounts(descriptors)
7     bitOrder = sortAscending(counts)
8
9     for bitIndex in bitOrder:
10        if len(dissimilarDescriptors) >= len(similarDescriptors):
11            break
12        for descriptor in similarDescriptors:
13            if descriptor[bitIndex] == 1:
14                similarDescriptors.remove(descriptor)
15                dissimilarDescriptors.insert(descriptor)
16
17        node.similarBranch = create_node()
18        node.similarBranch = buildDissimilarityTree(node.similarBranch,
19            similarDescriptors)
20
21        node.dissimilarBranch = create_node()
22        node.dissimilarBranch = buildDissimilarityTree(node.
23            dissimilarBranch, dissimilarDescriptors)
24
25        node.productdescriptor = computeAND(descriptors)
26        node.sumdescriptor = computeOR(descriptors)
27
28    return node

```

Programm Code A6.4: Aufbau eines dissimilarity tree in Anlehnung an van Blokland & Theoharis (2021).

Tabelle A6.1: Größe des dissimilarity tree abhängig von den gewählten Hyperparametern.

Bogen- toleranz	Winkel- toleranz	Anzahl Eckpunkte	Anzahl Knoten	Baum- tiefe	Größe bei 32x32 Bit	Größe bei 64x64 Bit
0,08 mm	18°	51.577.365	4.177.963	21	7.2 GB	28.8 GB
1 mm	18°	20.102.100	2.070.823	20	3.0 GB	12.0 GB
1 mm	30°	11.740.011	1.045.755	20	1.7 GB	6.7 GB
2 mm	30°	10.078.119	1.038.715	20	1.6 GB	5.9 GB

```

1 def queryDissimilarityTree(query, rootNode, resultCount):
2     openQueue = create_priority_queue()
3     openQueue.insert(rootNode)
4     searchResults = create_list()
5
6     while len(searchResults) < resultCount and searchResults[-1].
distance > openQueue[0].minDistance:
7         node = openQueue.remove(0)
8         if isLeafNode(node):
9             searchResults.append(node.descriptors)
10            searchResults.computeDistanceTo(query)
11            searchResults.sortByDistance()
12            searchResults.shrinkTo(resultCount)
13        else:
14            node.similarBranch.minDistance = minWHDist(query, node.
similarBranch)
15            node.dissimilarBranch.minDistance = minWHDist(query, node.
dissimilarBranch)
16
17            if node.similarBranch.minDistance < searchResults[-1].
distance:
18                openQueue.insert(node.similarBranch)
19            if node.dissimilarBranch.minDistance < searchResults[-1].
distance:
20                openQueue.insert(node.dissimilarBranch)
21
22 def winWHDist(query, node):
23     return sum(popcnt(query and not node.sumImage))*(len(query) /
popcnt(query))+sum(popcnt(not query and node.productImage))*len(
query)/(len(query)-popcnt(query))

```

Programm Code A6.5: Abfrage des dissimilarity tree in Anlehnung an van Blokland & Theoharis (2021).

A6.3.2 Quantitative Analyse des Dissimilarity Tree

Tabelle A6.2: Standardparameter nach van Blokland & Theoharis (2021).

Hyperparameter	Wert
Bogentoleranz	0.08 mm
Winkeltoleranz	18°
Vote threshold	100 votes
Radius	100 mm
Deskriptorgröße	32x32 Bit

Tabelle A6.3 zeigt die Ergebnisse für die in Tabelle A6.2 angegebenen Standardparameter. Der Algorithmus erreicht eine Precision von insgesamt 80 % (gemittelt über alle Kategorien). Dabei fällt auf, dass Abstufungen in einem Blech deutlich besser erkannt werden als einzelne Kanten. Grund dafür ist der Unterschied in der Größe einer Abstufung im Vergleich zu einer Kante. Letztere werden bei einem Radius von 100 mm nicht zuverlässig erkannt.

Tabelle A6.3: Benchmark Ergebnisse für Standardparameter.

Kategorie	Anzahl korrekter Votes	Anzahl Abfragen	Precision
Kanten	4	10	40 %
Abstufungen	10	10	100 %
Flächen	9	10	90 %
Gesamt	23	30	80 %

Aus diesem Grund ist in Abbildung A6.3 und Abbildung A6.4 der Einfluss des Radius und der Größe des QUICCI-Deskriptors auf die Precision dargestellt. Die Abbildungen zeigen, dass für eine robuste Identifikation von Kanten ein hinreichend kleiner Radius (kleiner 20 mm) und ein großer Deskriptor (64 bit) notwendig sind. Bei Abstufungen ist das Gegenteil zu beobachten, wobei die Precision bei einem Radius größer 20 mm immer 100 % beträgt. Bei der Analyse von Flächen ist keine eindeutige Systematik in der Auswirkung der Parameter auf die Precision zu beobachten. Tendenziell sind hierbei größere Radien und Deskriptoren zu bevorzugen.

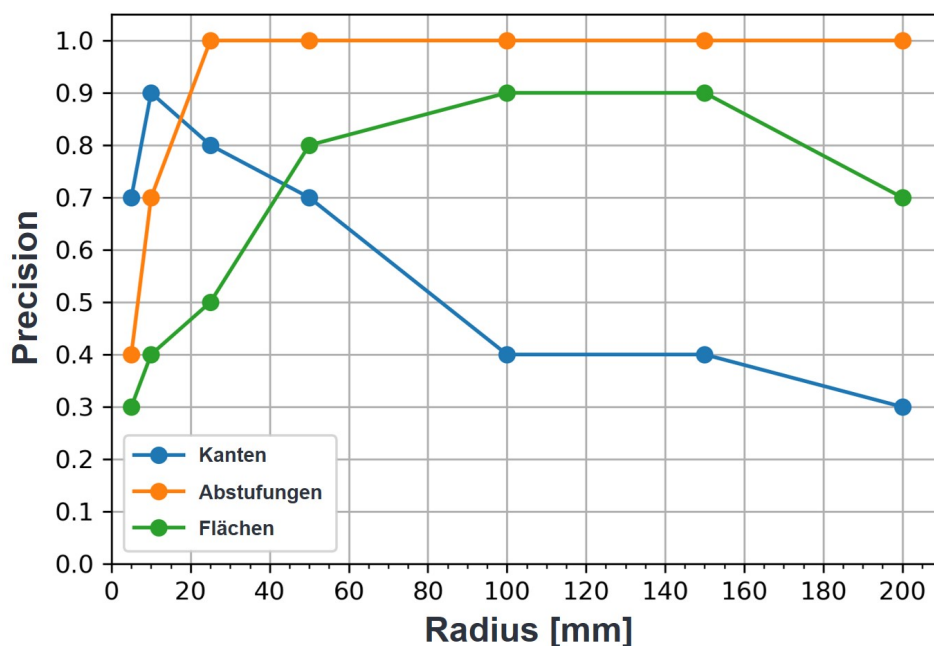


Abbildung A6.3: Einfluss des Radius auf die Precision (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Ortiz Lizarraga 2024).

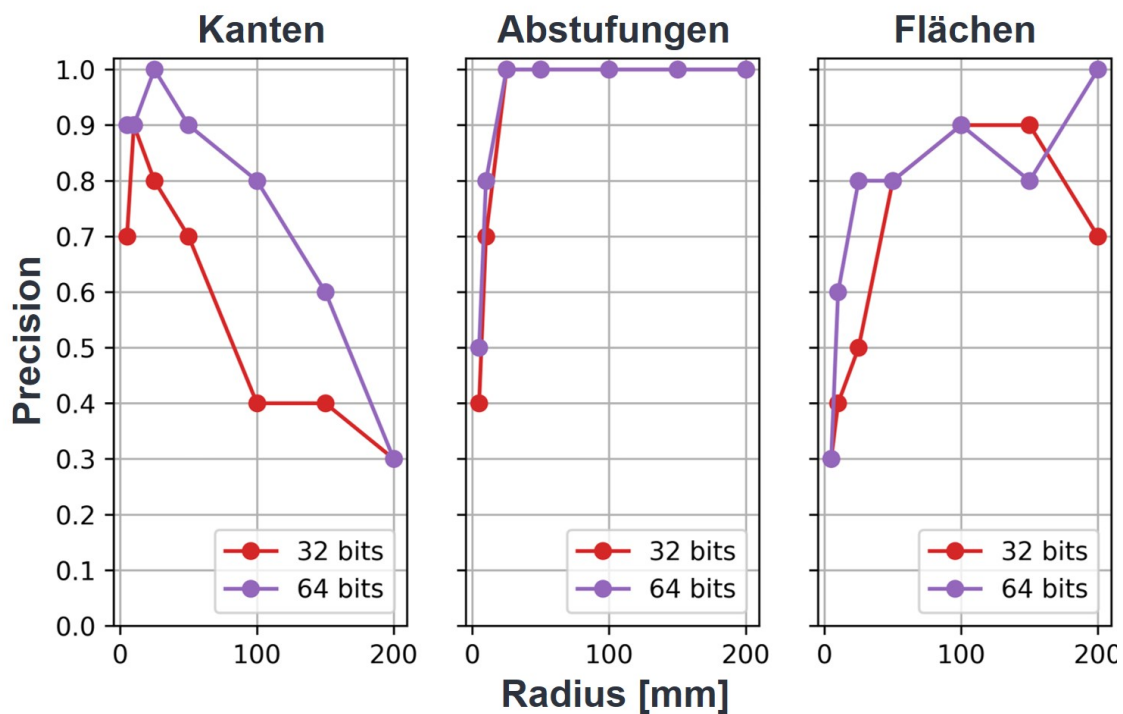


Abbildung A6.4: Einfluss der Größe des QUICCI-Deskriptors auf die Precision (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Ortiz Lizarraga 2024).

Am Beispiel der Variation von Bogen- und Winkeltoleranz in Abbildung A6.5 ist ersichtlich, dass die in van Blokland & Theoharis (2021) angegebenen Standardparameter am besten geeignet sind.

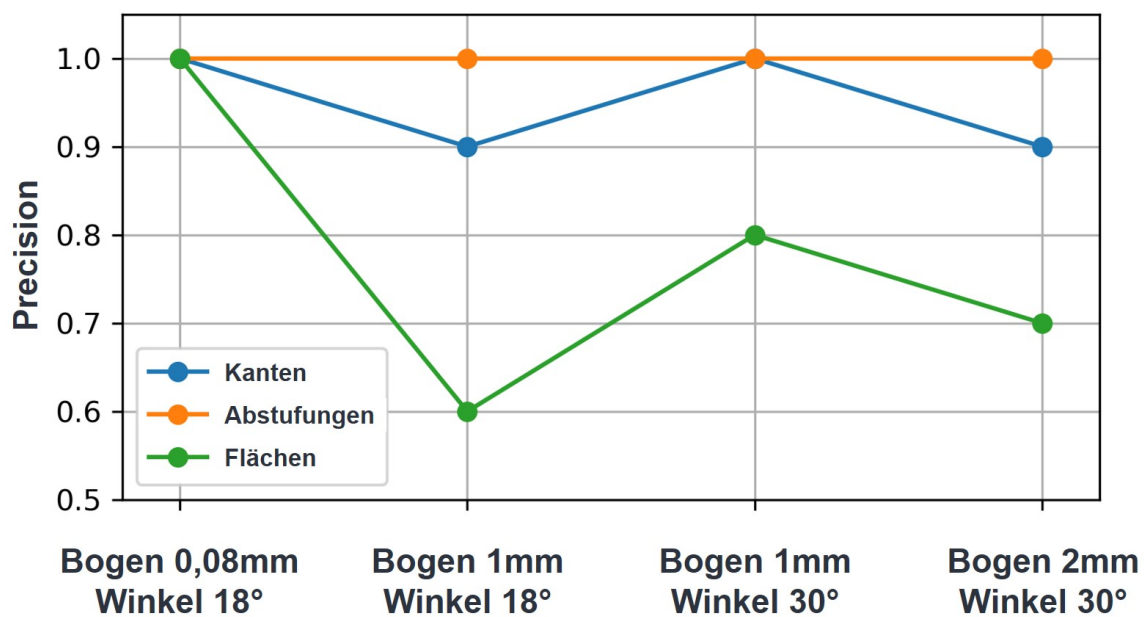


Abbildung A6.5: Einfluss von Bogen- und Winkeltoleranz auf die Precision (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Ortiz Lizarraga 2024).

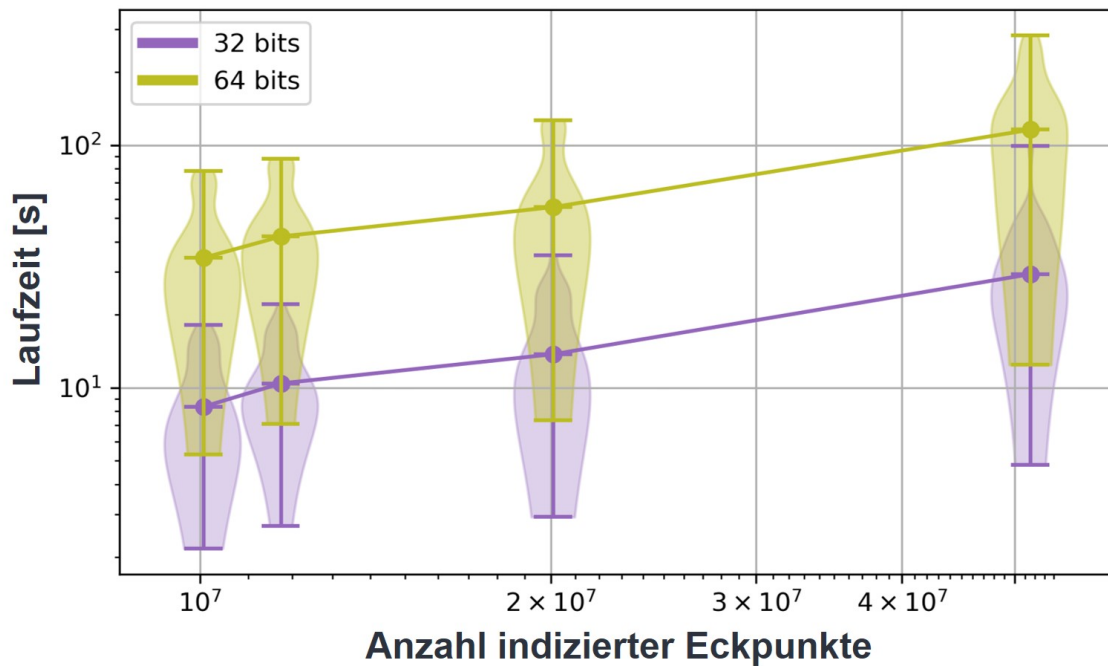
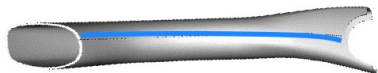


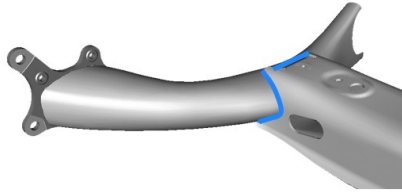
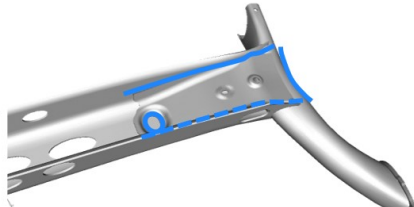

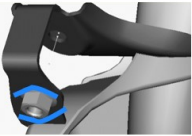
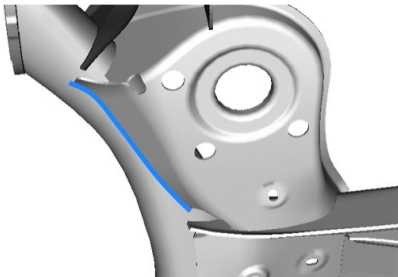


Abbildung A6.6: Einfluss der Modellgröße auf die Suchzeit (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Ortiz Lizarraga 2024).

Zuletzt zeigt Abbildung A6.6 den Einfluss der Modellgröße auf die Laufzeit zur Suche ähnlicher Objekte. Die Modellgröße wird dabei durch die Anzahl der Eckpunkte eines Meshes und damit die Anzahl der QUICCI Deskriptoren je Bauteil indiziert. Ein Vergleich der Mittelwerte zeigt einen nahezu logarithmischen Zusammenhang zwischen Suchzeit und Modellgröße.

A7 Anhang zu Kapitel 5.2 – Systemmodellierung

Tabelle A7.1: Produktstruktur gemäß des RTB Baukastens im Anwendungsbeispiel.

Bauteile des Baukastens	Features (links/rechts symmetrisch)	Erklärung anhand ausgewählter Bilder
Längslenker (l/r)	SN01 und SN02 <i>optional nur bei geteiltem Längslenker</i>	
Längslenker (l/r)	LN01 und LN02	
Längslenker (l/r) und Flansch (l/r)	SN03 und SN04	
Längslenker (l/r) und Querträger	Alternativen: 1. SN05 und SN06 <i>Bei Variante ohne Stützblech</i> 2. SN09 und SN10 <i>Seitliche Befestigung</i> 3. SN11 und SN12 <i>Seitliche Befestigung</i> 4. SN15 und SN16 <i>immer vorhanden</i>	
Längslenker (l/r) und Stützblech (l/r)	SN05.1 und SN06.1 <i>optional nur bei Stützblech</i>	
Stützblech (l/r) und Torsionsprofil	SN07 und SN08 <i>optional nur bei Stützblech</i>	
Stoßdämpferkonsole (l/r) und Schweißmutter (l/r)	SN13 und SN14 <i>optional nur bei Schweißmutter</i>	
Federteller (l/r) und Längslenker (l/r)	Alternativen: 1. SN17 und SN18 + 2. SN19 und SN20 <i>immer vorhanden</i> 3. SN17.1 und SN18.1 4. + SN19.1 und SN20.1 5. + SN29 und SN30 <i>optional nur bei Variante Federteller nicht an Querträger</i>	

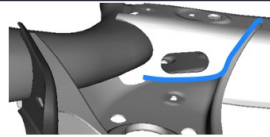
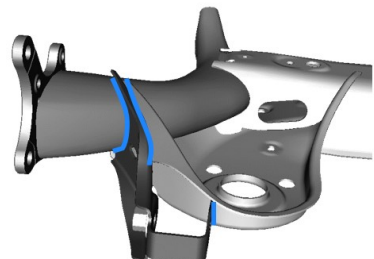
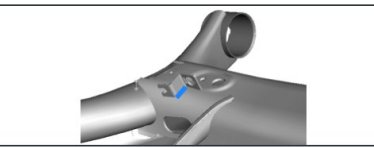
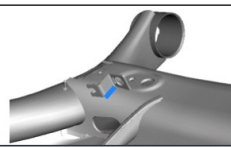
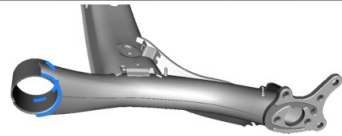
Bauteile des Baukastens	Features (links/rechts symmetrisch)	Erklärung anhand ausgewählter Bilder
Federaufnahme (l/r) und Querträger	SN21 und SN22 <i>optional</i>	
Stoßdämpferkonsole (l/r) und Federaufnahme (l/r)	<i>Je nach Variante entweder:</i> SN23 und SN24 + SN35 und SN36	
Stoßdämpferkonsole (l/r) und Längslenker (l/r)	<i>oder:</i> SN25 und SN26 <i>(oder beides)</i>	
Bremschlauchhalter (l/r) und Querträger	SN27 und SN28 <i>optional</i>	
Längslenker (l/r) und Lagerbuchse (l/r)	SN31 und SN32 + SN33 und SN34	

Tabelle A7.2: SysML Instanztabelle des RTB Produktmodells nach A_Schenkel 2023.

#	Name	<input type="checkbox"/> verbundene Teile : Bauteil	<input type="checkbox"/> Bauteil : Bauteil	<input type="checkbox"/> Prozess : Prozess	<input type="checkbox"/> Aufteilung : Boolean	<input type="checkbox"/> Länge : length [millimetre]
1	<input type="checkbox"/> LN01		<input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil	<input type="checkbox"/> LasernLN01 : Lasern		
2	<input type="checkbox"/> LN02		<input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil	<input type="checkbox"/> LasernLN02 : Lasern		
3	<input type="checkbox"/> SN01	<input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN01 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	370 mm
4	<input type="checkbox"/> SN02	<input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN02 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	370 mm
5	<input type="checkbox"/> SN03	<input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil <input type="checkbox"/> Flansch_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN03 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	327 mm
6	<input type="checkbox"/> SN04	<input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil <input type="checkbox"/> Flansch_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN04 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	327 mm
7	<input type="checkbox"/> SN05.1	<input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil <input type="checkbox"/> Stützblech_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN05.1 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	123 mm
8	<input type="checkbox"/> SN06.1	<input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil <input type="checkbox"/> Stützblech_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN06.1 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	123 mm
9	<input type="checkbox"/> SN07	<input type="checkbox"/> Querträger : Bauteil <input type="checkbox"/> Stützblech_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN07 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	730 mm
10	<input type="checkbox"/> SN08	<input type="checkbox"/> Querträger : Bauteil <input type="checkbox"/> Stützblech_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN08 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	730 mm
11	<input type="checkbox"/> SN09	<input type="checkbox"/> Querträger : Bauteil <input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN09 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	145 mm
12	<input type="checkbox"/> SN10	<input type="checkbox"/> Querträger : Bauteil <input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN10 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	145 mm
13	<input type="checkbox"/> SN11	<input type="checkbox"/> Querträger : Bauteil <input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN11 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	120 mm
14	<input type="checkbox"/> SN12	<input type="checkbox"/> Querträger : Bauteil <input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN12 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	120 mm
15	<input type="checkbox"/> SN13	<input type="checkbox"/> Stoßdämpferkonsole_Links : Bauteil <input type="checkbox"/> Schweißmutter_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN13 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	43 mm
16	<input type="checkbox"/> SN14	<input type="checkbox"/> Stoßdämpferkonsole_Rechts : Bauteil <input type="checkbox"/> Schweißmutter_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN14 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	43 mm
17	<input type="checkbox"/> SN15	<input type="checkbox"/> Querträger : Bauteil <input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN15 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	54 mm
18	<input type="checkbox"/> SN16	<input type="checkbox"/> Querträger : Bauteil <input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN16 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	54 mm
19	<input type="checkbox"/> SN17	<input type="checkbox"/> Federaufnahme_Links : Bauteil <input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN17 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	50 mm
20	<input type="checkbox"/> SN18	<input type="checkbox"/> Federaufnahme_Rechts : Bauteil <input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN18 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	50 mm
21	<input type="checkbox"/> SN19	<input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil <input type="checkbox"/> Federaufnahme_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN19 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	104 mm
22	<input type="checkbox"/> SN20	<input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil <input type="checkbox"/> Federaufnahme_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN20 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	104 mm
23	<input type="checkbox"/> SN21	<input type="checkbox"/> Querträger : Bauteil <input type="checkbox"/> Federaufnahme_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN21 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	177 mm
24	<input type="checkbox"/> SN22	<input type="checkbox"/> Querträger : Bauteil <input type="checkbox"/> Federaufnahme_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN22 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	177 mm
25	<input type="checkbox"/> SN23	<input type="checkbox"/> Federaufnahme_Links : Bauteil <input type="checkbox"/> Stoßdämpferkonsole_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN23 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	44 mm
26	<input type="checkbox"/> SN24	<input type="checkbox"/> Federaufnahme_Rechts : Bauteil <input type="checkbox"/> Stoßdämpferkonsole_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN24 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	44 mm
27	<input type="checkbox"/> SN25	<input type="checkbox"/> Stoßdämpferkonsole_Links : Bauteil <input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN25 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	106 mm
28	<input type="checkbox"/> SN26	<input type="checkbox"/> Stoßdämpferkonsole_Rechts : Bauteil <input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN26 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	106 mm
29	<input type="checkbox"/> SN27	<input type="checkbox"/> Querträger : Bauteil <input type="checkbox"/> Bremsschlauchhalter_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN27 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	18 mm
30	<input type="checkbox"/> SN28	<input type="checkbox"/> Querträger : Bauteil <input type="checkbox"/> Bremsschlauchhalter_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN28 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	18 mm
31	<input type="checkbox"/> SN29	<input type="checkbox"/> Federaufnahme_Links : Bauteil <input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN29 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	182 mm
32	<input type="checkbox"/> SN30	<input type="checkbox"/> Federaufnahme_Rechts : Bauteil <input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN30 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	182 mm
33	<input type="checkbox"/> SN31	<input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil <input type="checkbox"/> Lagerbuchse_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN31/SN33 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	140 mm
34	<input type="checkbox"/> SN32	<input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil <input type="checkbox"/> Lagerbuchse_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN32/SN34 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	140 mm
35	<input type="checkbox"/> SN33	<input type="checkbox"/> Längslenker_Links : Bauteil <input type="checkbox"/> Lagerbuchse_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN31/SN33 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	152 mm
36	<input type="checkbox"/> SN34	<input type="checkbox"/> Längslenker_Rechts : Bauteil <input type="checkbox"/> Lagerbuchse_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN32/SN34 : Schweißen	<input checked="" type="checkbox"/> true	152 mm
37	<input type="checkbox"/> SN35	<input type="checkbox"/> Federaufnahme_Links : Bauteil <input type="checkbox"/> Stoßdämpferkonsole_Links : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN35 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	88 mm
38	<input type="checkbox"/> SN36	<input type="checkbox"/> Federaufnahme_Rechts : Bauteil <input type="checkbox"/> Stoßdämpferkonsole_Rechts : Bauteil		<input type="checkbox"/> SchweißenSN36 : Schweißen	<input type="checkbox"/> false	88 mm

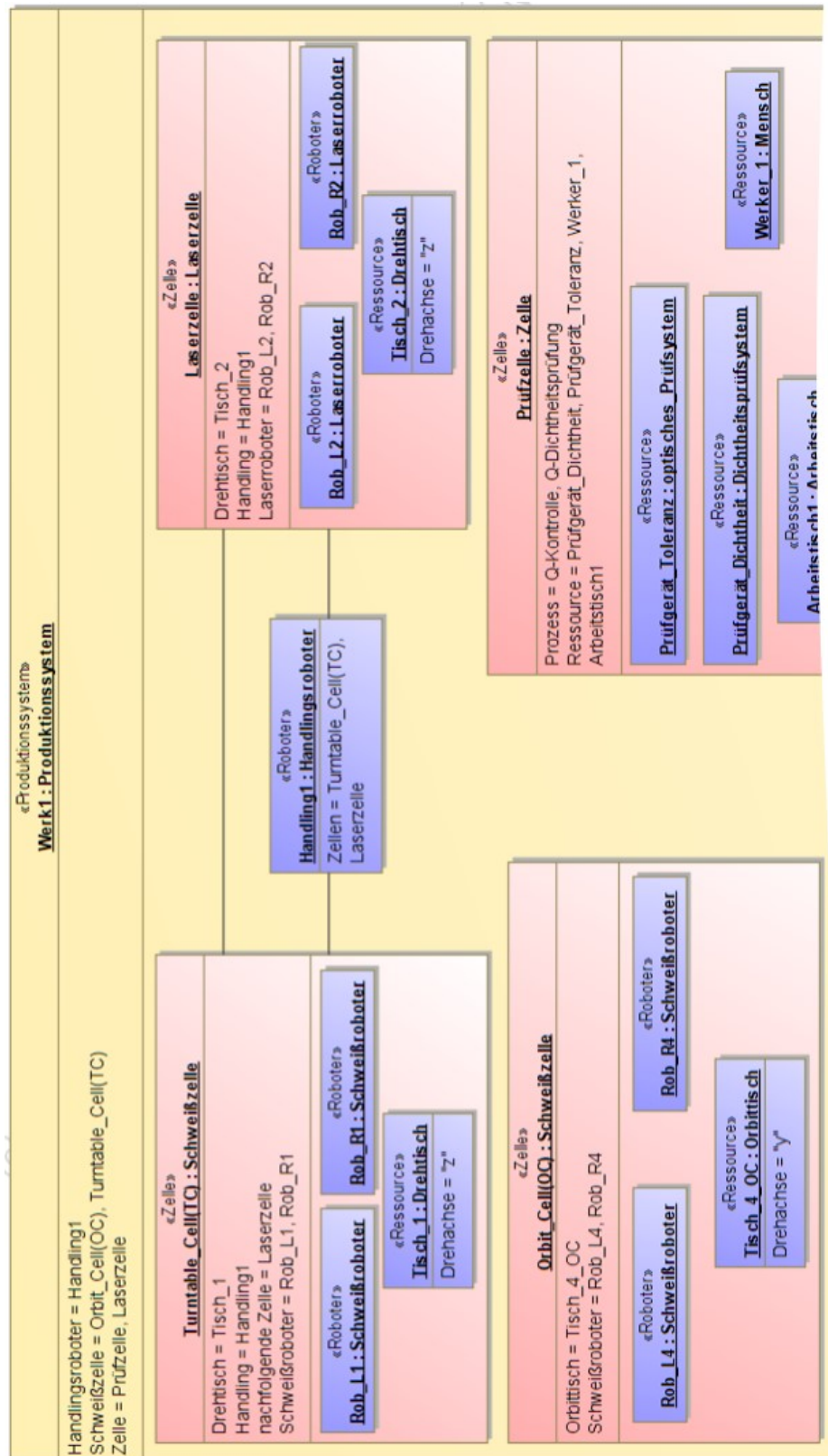


Abbildung A7.1: Ausschnitt des instantiierten Produktionssystemmodells im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung nach A_Schenkel 2023).

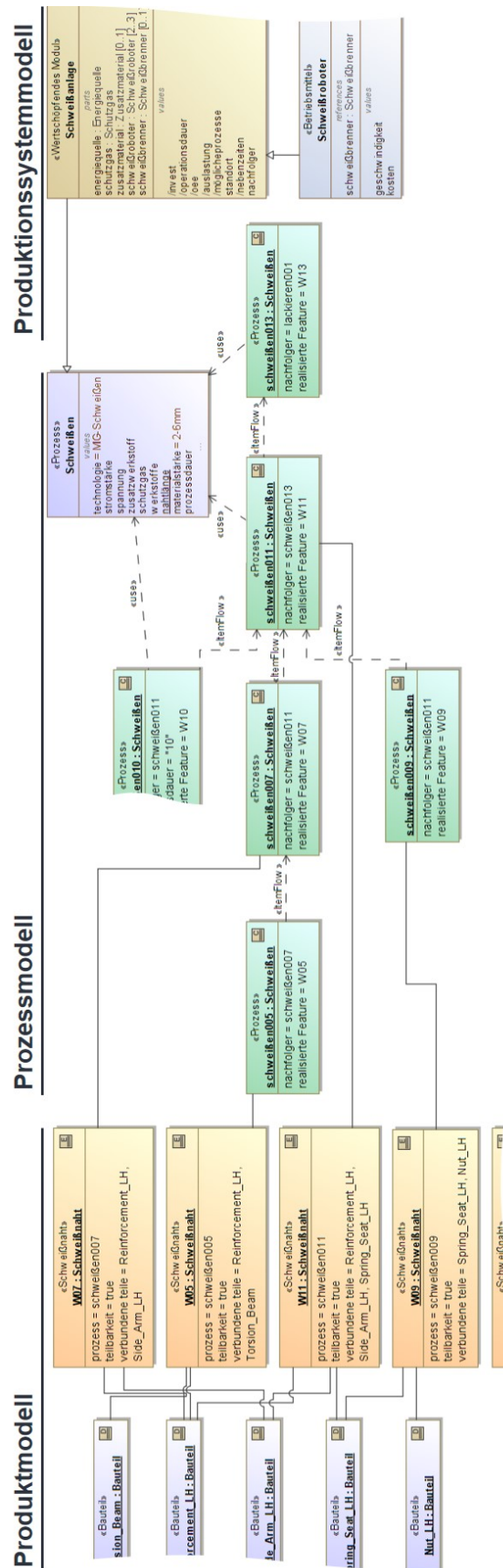
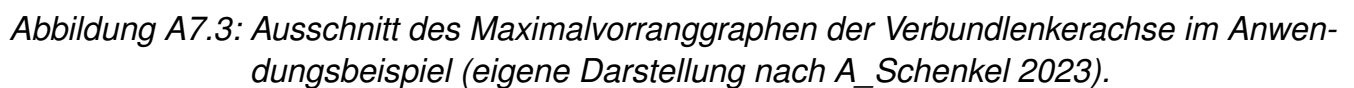


Abbildung A7.2: Exemplarische Wechselwirkungen zwischen Produkt-, Prozess- und Produktionssystemmodell (eigene Darstellung).



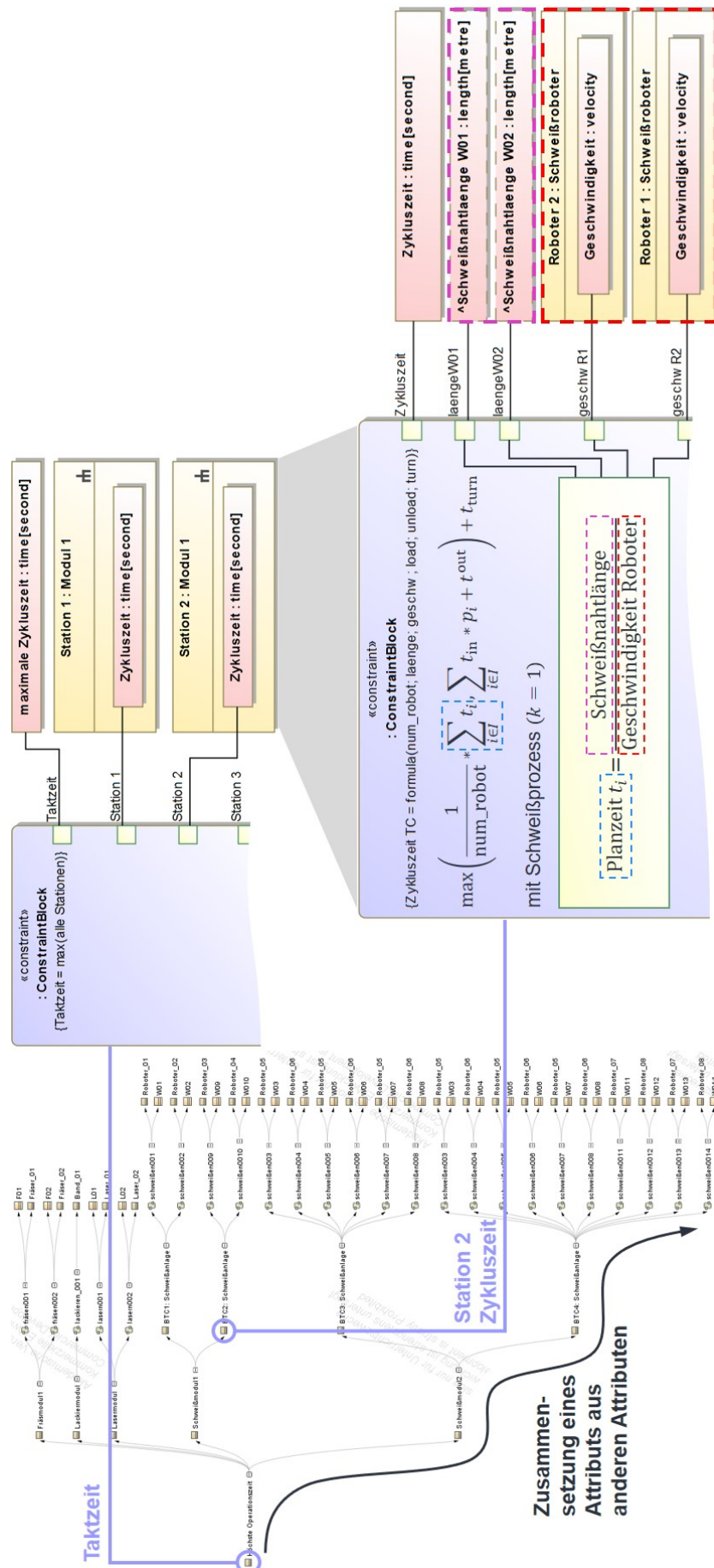


Abbildung A7.4: Modellierung zeitbezogener Constraints (eigene Darstellung).

		Product features								Production resources							
		Laser cut								Welding cells							
		L01	L02	L03	L04	L05	L06	L07	L08	Weld seam	Production processes	L01	L02	L03	L04	L05	L06
		2	2	2	2	2	2	3	3	7	2	5	3	3	2	2	2
Production System-Requirements																	
R	49 Accessibility of weld seams	7								7							
	50 Use of robots above the weight limit										7	2	5				
	52 Tightness of the weld seam	6								6							
	54 Split weld seam	4								4							
	55 Maximum process duration									10							
	56 Laser cutting tolerance	8	8														
	57 Symmetrical welding and cutting	14	8							6							
	58 Sequence of processes	2	2														
	60 Welding speed	60								60							
	61 360° weld seam	2								2							
	62 Maximum space consumption										7	2	5				
	63 Maximum dimensions of the assembly																

		Production processes							
		L01	L02	L03	L04	L05	L06	L07	L08
		1	1	1	1	1	1	1	1
Product features									
Laser cut		4	4	22	2	2	1	1	12
Weld seam		4	4	22	2	2	1	1	12
Welding of Longitudinal Arm (Right)		1	1	1	1	1	1	1	1
Welding of Longitudinal Arm (Left)		1	1	1	1	1	1	1	1
Welding of Flange (Right)		1	1	1	1	1	1	1	1
Welding of Flange (Left)		1	1	1	1	1	1	1	1
Welding of Spring Mounting		1	1	1	1	1	1	1	1
Welding of Sleeve Flange		1	1	1	1	1	1	1	1
Welding of Spring Mounting		1	1	1	1	1	1	1	1

Name	Process duration	Built-up assembly	Features	Executing production resources	Process-related requirements	Feature-related requirements	Resource-related requirements
Welding of Longitudinal Arm (Right)	9.25	Side Arm (Right)	w02	OP10	55 Maximum process duration	52 Tightness of the weld seam 49 Accessibility of weld seams 57 Symmetrical welding and cutting 60 Welding speed 61 360° weld seam	62 Maximum space consumption 50 Use of robots above the weight limit
Laser Cutting of Longitudinal Arm (Right)	13.63	Side Arm (Right)	L02 L04 L06 L08	OP15	55 Maximum process duration	56 Laser cutting tolerance 57 Symmetrical welding and cutting 58 Sequence of processes	62 Maximum space consumption 50 Use of robots above the weight limit
Welding of Spring Mounting + Shock Absorber Bracket	14.56	Shock Absorber Bracket (Left) Brake Hose Holder (Right) Brake Hose Holder (Left) Bulkhead Plate (Left) Flange (Right) Weld Nut (Right) Side Arm (Left) Flange (Left) Torsion Profile Bulkhead Plate (Right) Shock Absorber Bracket (Right) Spring Mounting (Left) Side Arm (Right) Weld Nut (Left) Spring Mounting (Right)	w49 w51 w52 w13 w14 w69 w70 w59 w60 w48 w47 w33 w34 w25 w26 w31 w32 w30	OP50	55 Maximum process duration	60 Welding speed 49 Accessibility of weld seams	62 Maximum space consumption 50 Use of robots above the weight limit

Abbildung A7.5: Oben links: SysML Satisfy-Matrix zwischen Anforderungen und Systemelementen. Oben rechts: SysML Allocatin-Matrix zwischen Systemelementen und Prozessschritten. Unten: Ergebnis der konsistenten Modellierung – Prozessschritte und deren explizit und implizit verbundene Elemente. (eigene Darstellung nach Martin & Schäfer et al. 2024).

A8 Anhang zu Kapitel 5.3 – Optimierung

A8.1 Initialisierung des Assembly Line Balancing Modells

Tabelle A8.1: Equipmentkosten im Anwendungsfall.

Maschinenbetriebskosten	30	[€ / h]
Lohnkostensatz	40	[€ / h]
Basiskosten Station inkl. Haltevorrichtung	180.000	[€]
Aufrüstung zur TC inkl. zusätzlicher Haltevorrichtung	80.000	[€]
zweiter Schweißroboter (ohne Maschinenstunden)	20.000	[€]
zweiter Schweißroboter (mit Maschinenstunden)	187.400	[€ / a]
Kosten Handhabung durch Menschen (Lohnkostensatz)	223.200	[€ / a]
Kosten Handhabungsroboter (ohne Maschinenstunden)	20.000	[€]
Kosten Handhabungsroboter (mit Maschinenstunden)	187.400	[€ / a]

Tabelle A8.2: Equipmentabhängige Zeiten im Anwendungsfall.

Transferzeit Mensch	4 s
Transferzeit Roboter	2 s
Positionierzeit Roboter	2,5 s
Zeit zum Drehen bei einer TC	5 s

Tabelle A8.3: Flächenbedarfe des Stationsequipments im Anwendungsfall.

Fläche einer OC	7,678 m ²
Fläche einer TC	11,066 m ²
Fläche zusätzlicher Schweißroboter	1,000 m ²
Fläche Handhabung / Transfer durch Menschen	1,000 m ²
Fläche Handhabung / Transfer durch Roboter	2,000 m ²

Tabelle A8.4: Im Modell als Parameter eingeführte Gesamtkosten.

Equipment	Gesamtkosten (für 3 Jahre)
Eröffnung einer Station	682.200 €
Aufrüstung zur TC	80.000 €
Kosten eines Roboters	522.200 €
Kosten eines Mitarbeiters	334.800 €

Tabelle A8.5: Übersicht über Einzelteile und teilbezogene Daten im Anwendungsfall.

Bauteil	Masse [kg]	Handhabungszeit [s]	
		Mensch	Roboter
Längslenker_links	2,61	4,0	2,0
Längslenker_rechts	2,62	4,0	2,0
Querträger	7,93	6,5	2,0
Adapterplatte_links	0,60	4,0	2,0
Adapterplatte_rechts	0,60	4,0	2,0
Verstärkungsblech_links	0,40	4,0	2,0
Verstärkungsblech_rechts	0,40	4,0	2,0
Federteller_links	1,05	5,5	3,5
Federteller_rechts	1,05	5,5	3,5
Stoßdämpferkonsole_links	0,83	4,0	3,5
Stoßdämpferkonsole_rechts	0,83	4,0	3,5
Schweißmutter_links	0,02	3,5	4,0
Schweißmutter_rechts	0,02	3,5	4,0
Bremsschlauchhalter_links	0,05	3,0	4,5
Bremsschlauchhalter_rechts	0,05	3,0	4,5
Lagerbuchse_links	0,50	3,0	2,0
Lagerbuchse_rechts	0,50	3,0	2,0

Tabelle A8.6: Aufgaben und zugehörige Zeiten im Anwendungsfall.

Aufgabe	Beschreibung	Dauer [s]
s1_rechts	Schweißen Längslenker	7,70
s1_links	Schweißen Längslenker	7,70
l1_rechts	Laserschneiden Längslenker	5,76
l1_links	Laserschneiden Längslenker	5,72
s2_rechts	Schweißen Lagerbuchse - Längslenker	22,67
s2_links	Schweißen Lagerbuchse - Längslenker	22,67
s3_rechts	Schweißen Adapterplatte - Längslenker	31,40
s3_links	Schweißen Adapterplatte - Längslenker	31,40
s4_rechts	Schweißen Verstärkungsblech - Längslenker	8,98
s4_links	Schweißen Verstärkungsblech - Längslenker	7,94
s5_rechts	Schweißen Verstärkungsblech - Querträger	49,71
s5_links	Schweißen Verstärkungsblech - Querträger	49,71
s6_rechts	Schweißen Längslenker - Querträger	26,79
s6_links	Schweißen Längslenker - Querträger	26,03
s7_rechts	Schweißen Federteller - Querträger	13,75
s7_links	Schweißen Federteller - Querträger	13,75
s8_rechts	Schweißen Federteller - Längslenker	23,88
s8_links	Schweißen Federteller - Längslenker	24,26
s9.1_rechts	Schweißen Stoßdämpferkonsole - Federteller 1	3,08
s9.1_links	Schweißen Stoßdämpferkonsole - Federteller 1	3,08
s9.2_rechts	Schweißen Stoßdämpferkonsole - Federteller 2	7,33
s9.2_links	Schweißen Stoßdämpferkonsole - Federteller 2	6,29
s10_rechts	Schweißen Stoßdämpferkonsole - Längslenker	7,77
s10_links	Schweißen Stoßdämpferkonsole - Längslenker	8,08
s11_rechts	Schweißen Bremsschlauchhalter - Querträger	3,56
s11_links	Schweißen Bremsschlauchhalter - Querträger	3,56
s12_rechts	Schweißen Schweißmutter - Stoßdämpferkonsole	4,78
s12_links	Schweißen Schweißmutter - Stoßdämpferkonsole	4,78
check	End-of-Line Prüfung	30,00

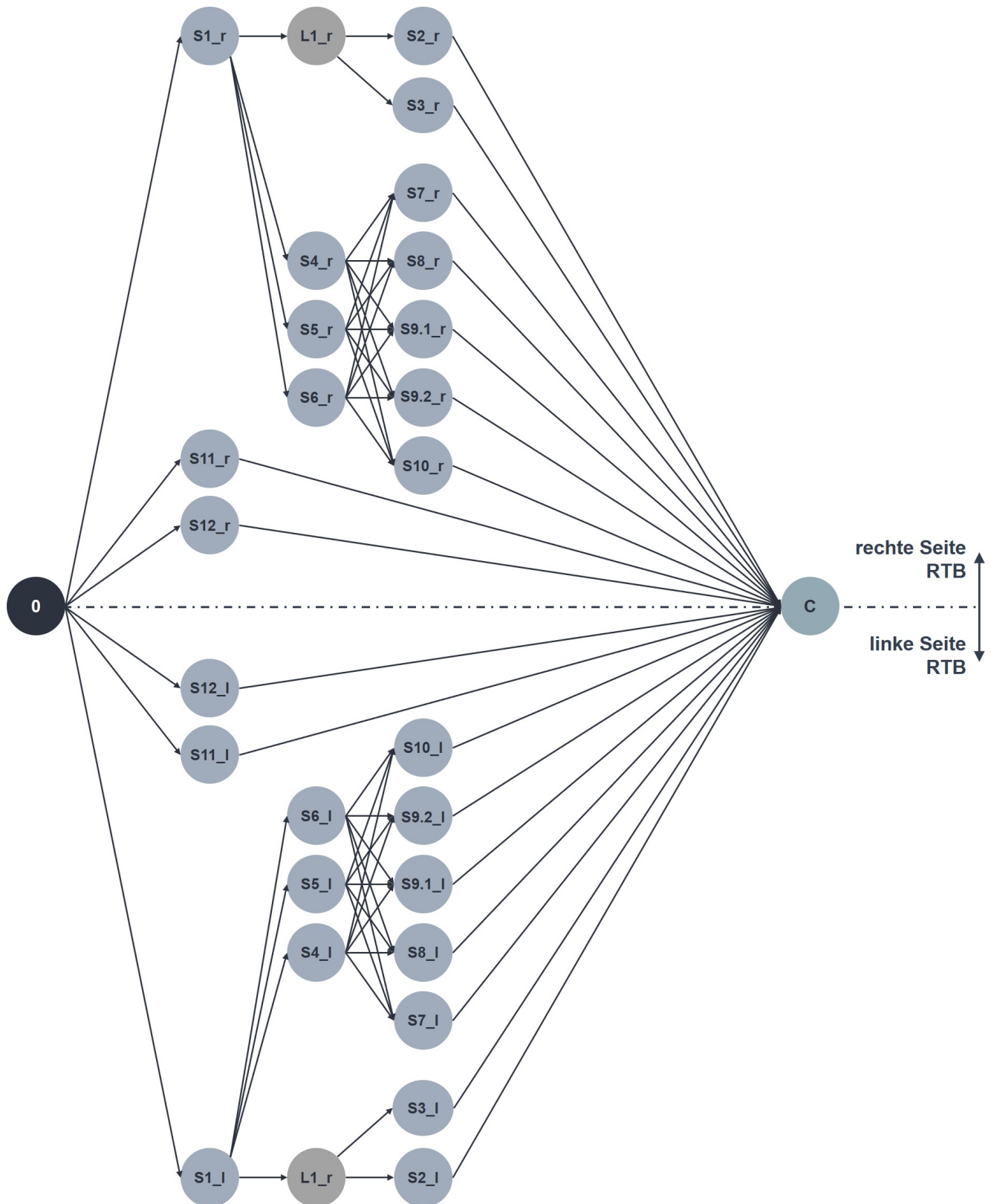


Abbildung A8.1: Variantenspezifischer Vorranggraph im Anwendungsfall.

Fortsetzung Algorithmus 1: Pseudocode zur Erzeugung eines Individuums.

```

33
34
35
36     if „condition“ wahr ist then
37         wähle zufällige Aufgabe „next_try_position“ aus „r_chosen_task_time_position2“
38         bestimme zugehörige Dauer „next_try_time“ der Aufgabe „next_try_position“
39         if aktuelle Station noch zeitliche Kapazität hat, ausgewählte Aufgabe noch nicht
           zugeordnet ist und die Station den richtigen Typen für die Aufgabe hat then
40             berechne „sum_x_ijk“ und „count_x_ijk“  $\forall i \in I$ 
41             bestimme die Anzahl der Aufgaben, die den gleichen Stationstyp benötigen
42             if Anzahl ungleich 1 ist then
43                 if Aufgabe „chosen_task_time_position“ noch nicht einer Station
                     zugeordnet ist then
44                     | wähle zufällig einen Wert  $\in [\text{Min}, 1 - 2 * \text{Min}]$ 
45                 else if Aufgabe „chosen_task_time_position“ einer Station zugeordnet ist
                     then
46                     | wähle zufällig einen Wert  $\in [\text{Min}, 1 - 2 * \text{Min} - \text{sum\_x\_ijk}]$ 
47                 else if Aufgabe „chosen_task_time_position“ zwei Stationn zugeordnet ist
                     then
48                     | weise der aktuellen Station den Anteil  $1 - \text{sum\_x\_ijk}$  zu
49                 else
50                     | weise der aktuellen Station die komplette Aufgabe zu
51                 if die Aufgabe vollständig bearbeitet ist then
52                     | aktualisiere den Prozessvorranggraphen
53                 Breche die for-Schleife ab
54             setze „new_station“ auf wahr
55         if „new_station“ wahr oder „condition“ falsch ist then
56             erhöhe „num_stations“ um 1
  
```

Algorithmus 2: Pseudocode der ersten Mutation nach A_Tse (2023).

Data: Individuum mit x_{ijk}

Result: (potentiell) modifiziertes Individuum

```

1  wähle zufällig eine Station „random_station“  $j \in \{1, 2, \dots, |J| - 1\}$  aus;
2  for  $\forall k \in K$  do
3      if „random_station“ und „random_station+1“ den gleichen Typen  $k$  besitzen then
4          for  $i = 0$  to 10 do
5              wähle zufällig eine Aufgabe „random_task“  $\in I$  aus
6              if die Aufgabe „random_task“ der Station „random_station“ zugeordnet ist then
7                  | weise die Aufgabe „random_task“ der Station „random_station+1“ zu
8              else if die Aufgabe „random_task“ der Station „random_station+1“ zugeordnet ist
                  then
9                  | weise die Aufgabe „random_task“ der Station „random_station“ zu
10             return Individuum
11 return Individuum
  
```

Algorithmus 3: Pseudocode der zweiten Mutation nach A_Tse (2023).

Data: Individuum mit Bearbeitungsroboter(n) α_j

Result: (potentiell) modifiziertes Individuum

- 1 wähle zufällig eine Station „random_station“ $\in J$ aus;
 - 2 wähle zufällig eine Anzahl an Bearbeitungsrobotern $\in \{1, 2\}$ aus;
 - 3 weise der Station „random_station“ den Wert zu
 - 4 **return** *Individuum*
-

Algorithmus 4: Pseudocode der dritten Mutation nach A_Tse (2023).

Data: Individuum mit Transfer γ_j^H, γ_j^R

Result: (potentiell) modifiziertes Individuum

- 1 wähle zufällig eine Station „random_station“ $\in J$ aus;
 - 2 wähle zufällig eine Anzahl der Schnittstellen $\in \{1, 2, 3\}$ aus;
 - 3 weise der Station „random_station“ den Wert zu;
 - 4 **if** *Anzahl der Schnittstellen* > 0 **then**
 - 5 | weise der Station „random_station“ die gleiche Anzahl an Handhabungsrobotern oder Menschen zu
 - 6 **return** *Individuum*
-

Algorithmus 5: Pseudocode der vierten Mutation nach A_Tse (2023).

Data: Individuum mit Handhabung β_j^H, β_j^R

Result: modifiziertes Individuum

- 1 wähle zufällig eine Station „random_station“ $\in J$ aus;
 - 2 **if** *Station „random_station“ einen Handhabungsroboter hat* **then**
 - 3 | weise der Station „random_station“ einen Menschen zu
 - 4 **else if** *Station „random_station“ einen Menschen zur Handhabung hat* **then**
 - 5 | weise der Station „random_station“ einen Handhabungsroboter zu
 - 6 **return** *Individuum*
-

Algorithmus 6: Pseudocode der fünften Mutation nach A_Tse (2023).

Data: Individuum mit TC/OC δ_j

Result: modifiziertes Individuum

- 1 wähle zufällig eine Station „random_station“ $\in J$ aus;
 - 2 **if** *Station „random_station“ einen Drehtisch (TC) besitzt* **then**
 - 3 | ordne der Station „random_station“ einen Arbeitstisch (OC) zu
 - 4 **else if** *Station „random_station“ einen Arbeitstisch (OC) besitzt* **then**
 - 5 | ordne der Station „random_station“ einen Drehtisch (TC) zu
 - 6 **return** *Individuum*
-

Algorithmus 7: Pseudocode der sechsten Mutation nach A_Tse (2023).

Data: Individuum mit x_{ijk}, c_t
Result: (potentiell) modifiziertes Individuum

```

1 wähle zufällig eine Aufgabe „random_task“  $\in I$  aus;
2 for  $\forall j \in J$  do
3   for  $\forall j_2 \in \{j, j+1, \dots, |J|\}$  do
4     if „random_task“ sowohl auf der Station  $j$  als auch auf  $j_2$  bearbeitet wird then
5       berechne die jeweilige Differenz zwischen Taktzeit  $c_t$  und den Zykluszeiten
6       if Differenz bei  $j$  größer ist als bei  $j_2$  then
7         weise Anteile der Aufgabe „random_task“ von  $j$  und  $j_2$  der Station  $j$  zu
8       else if Differenz bei  $j_2$  größer ist als bei  $j$  then
9         weise Anteile der Aufgabe „random_task“ von  $j$  und  $j_2$  der Station  $j_2$  zu
10 return Individuum

```

Algorithmus 8: Pseudocode der siebten Mutation nach A_Tse (2023).

Data: Individuum mit x_{ijk}, c_t
Result: (potentiell) modifiziertes Individuum

```

1 wähle zufällig eine Aufgabe „random_task“  $\in I$  aus;
2 for  $\forall j \in J$  do
3   for  $\forall j_2 \in \{j, j+1, \dots, |J|\}$  do
4     if „random_task“ sowohl auf der Station  $j$  als auch auf  $j_2$  bearbeitet wird then
5       berechne die jeweilige Differenz zwischen Taktzeit  $c_t$  und den Zykluszeiten
6       if Differenz bei  $j$  größer ist als bei  $j_2$  then
7         vergrößere den Anteil  $x_{ijk}$  um 1 Prozent
8         reduziere den Anteil  $x_{ijk_2}$  um 1 Prozent
9       else if Differenz bei  $j_2$  größer ist als bei  $j$  then
10        vergrößere den Anteil  $x_{ijk_2}$  um 1 Prozent
11        reduziere den Anteil  $x_{ijk}$  um 1 Prozent
12 return Individuum

```

Algorithmus 9: Pseudocode der achten Mutation nach A_Tse (2023).

Data: Individuum mit zwei benachbarten Stationen
Result: (potentiell) modifiziertes Individuum

```

1 erzeuge das Feld „choice“ mit  $|J|$  Nullen
2 for  $\forall k \in K$  do
3   for  $\forall j \in \{1, 2, \dots, |J| - 1\}$  do
4     if Station  $j$  und  $j+1$  den gleichen Typen  $k$  besitzen then
5       füge Summe der beiden Zykluszeiten an  $j$ -te Stelle von „choice“ hinzu
6 suche die Stelle „choice_station“ in der Menge „choice“ mit kleinsten positiven Wert
7 if Stelle „choice_station“ existiert then
8   weise alle Aufgaben von der Station  $j+1$  der Station  $j$  zu
9   lösche die Station  $j+1$ 
10 return Individuum

```

Algorithmus 10: Pseudocode der neunten Mutation nach A_Tse (2023).

Data: Individuum mit drei benachbarten Stationen
Result: (potentiell) modifiziertes Individuum

```

1 erzeuge das Feld „choice“ mit  $|J|$  Nullen
2 for  $\forall k \in K$  do
3   for  $\forall j \in \{2, 3, \dots, |J| - 1\}$  do
4     if Station  $j - 1$ ,  $j$  und  $j + 1$  den gleichen Typ  $k$  besitzen then
5       füge Summe der drei Zykluszeiten an  $j$ -te Stelle von „choice“ hinzu
6 übertrage alle positiven Werte von „choice“ in die Menge „positive_values“
7 if „positive_values“ nicht leer then
8   suche die Stelle „choice_station“ in der Menge „choice“ mit kleinsten positiven Wert
9   for  $\forall i \in I$  do
10    if Stationn „choice_station-1“ und „choice_station“ die Aufgabe  $i$  bearbeiten then
11      weise die Aufgabe  $i$  der Station „choice_station-1“ zu
12    else
13      weise die Aufgabe  $i$  der Station „choice_station+1“ zu
14    Lösche die Station „choice_station“
15 return Individuum

```

Algorithmus 11: Pseudocode der zehnten Mutation nach A_Tse (2023).

Data: Individuum mit Stationen
Result: (potentiell) modifiziertes Individuum

```

1 wähle zufällig einen Typ „random_type“  $\in K$  aus
2 for  $\forall j \in \{1, 2, \dots, |J| - 2\}$  do
3   if Station  $j$  und  $j + 2$  den gleichen Typ  $k$  besitzen then
4     weise alle Aufgaben von der Station  $j + 1$  der Station  $j$  zu
5     lösche die Station  $j + 1$ 
6 return Individuum

```

Algorithmus 12: Pseudocode des ersten Reparaturmechanismus nach A_Tse (2023).

Data: ungültiges Individuum
Result: (potentiell) zulässiges Individuum

```

1 erzeuge das Feld „choice“ mit  $|J|$  Nullen
2 for  $\forall k \in K$  do
3   for  $\forall j \in \{1, 2, \dots, |J| - 1\}$  do
4     if Station  $j$  und  $j + 1$  den gleichen Typen  $k$  besitzen then
5       füge Summe der beiden Zykluszeiten an  $j$ -te Stelle von „choice“ hinzu
6 Suche die Stelle „choice_station“ in der Menge „choice“ mit kleinstem positiven Wert
7 if Stelle „choice_station“ existiert then
8   weise alle Aufgaben von der Station  $j + 1$  der Station  $j$  zu
9   lösche die Station  $j + 1$ 
10 return Individuum

```

Algorithmus 13: Pseudocode des zweiten Reparaturmechanismus nach A_Tse (2023).

Data: ungütiges Individuum

Result: (potentiell) zulässiges Individuum

```

1 aktualisiere die Zykluszeiten for  $\forall j \in J$  do
2   if Zykluszeit von Station  $j$  den Kundentakt  $c_t$  überschreitet then
3     if Station  $j$  keinen Drehtisch TC hat then
4       weise der Station  $j$  einen Drehtisch TC zu
5     else if Station nur einen Bearbeitungsroboter hat then
6       weise der Station  $j$  einen zweiten Bearbeitungsroboter zu
7     else
8       for  $\forall i \in I$  do
9         if der Station  $j$  die Aufgabe  $i$  zugewiesen wurde then
10           füge die Aufgabe  $i$  zur Menge „intermediate_task“ hinzu
11           füge die Dauer der Aufgabe zur Menge „intermediate_time“ hinzu
12         berechne die Menge „availableTime“
13         initialisiere die Menge „ableStation“
14         definiere die Menge „possibleStation“
15         bestimme die ausgewählte Station „receiveStation“
16         if die Menge „intermediate_time“ nicht leer ist then
17           wähle die Aufgabe mit der kleinsten Bearbeitungsdauer aus
18           weise die Aufgabe der Station „receiveStation“ zu
19           Setze die Variable „condition“ auf wahr
20 return Individuum

```

A8.2.2 Exakte Lösung mit proprietärem Default Solver

```

1 from albalancer import interface
2 selected_objective = "cost"
3 objective_value = interface.run_model(objective=selected_objective)

```

Programm Code A8.6: Verwendung des entwickelten albalancer Package nach A_Schneider (2023)

```

1 m = grb.Model("ALBP_non-discrete_task_assignment")
2 x = m.addVars(data.tasks, data.stations, data.station_types,
3              lb=0, ub=1, vtype=grb.GRB.CONTINUOUS,
4              name="processing of task at station continuous")

```

Programm Code A8.7: Definition des Gurobi Modell-Objekts und Hinzufügen einer exemplarischen Variable in Gurobi.

```

1 m.addConstr(
2     (grb.quicksum(x[task, station, station_type]
3                  for station in data.stations) ==
4     data.station_type_required[station_type][task]
5     for task in data.tasks for station_type in data.station_types),
6     name="constraint_01")

```

Programm Code A8.8: Hinzufügen einer exemplarischen Constraint in Gurobi.

```

1 if objective == "stations":
2     m.setObjective(
3         grb.quicksum(v[station, station_type]
4                      for station in data.stations
5                      for station_type in data.station_types),
6         sense=grb.GRB.MINIMIZE)

```

Programm Code A8.9: Definition einer exemplarischen Zielfunktion in Gurobi.

A8.3 Evaluation und Interpretation der Ergebnisse

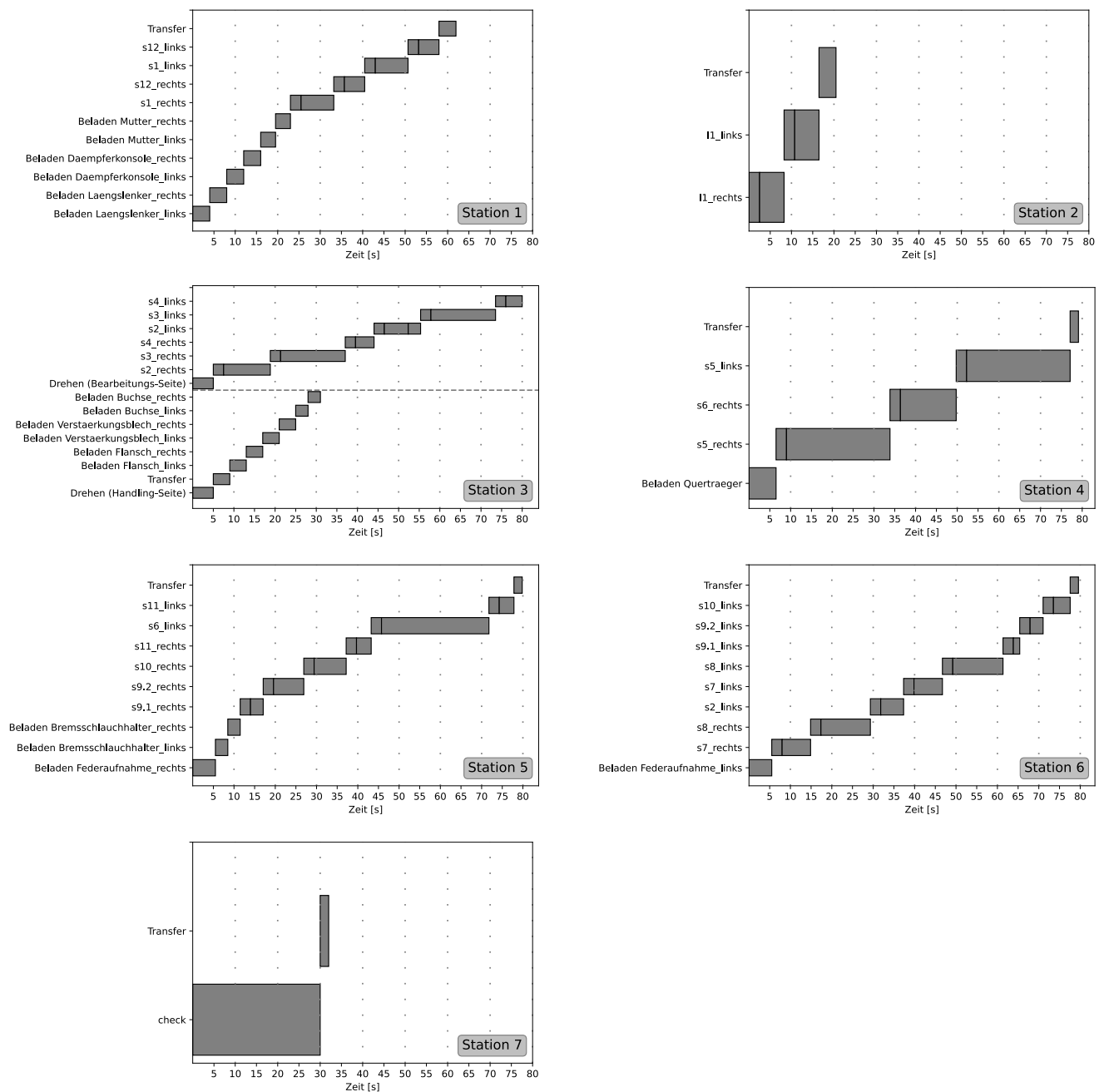


Abbildung A8.2: Belegung der resultierenden 7 Stationen bei exakter, einkriterieller Kostenminimierung (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).

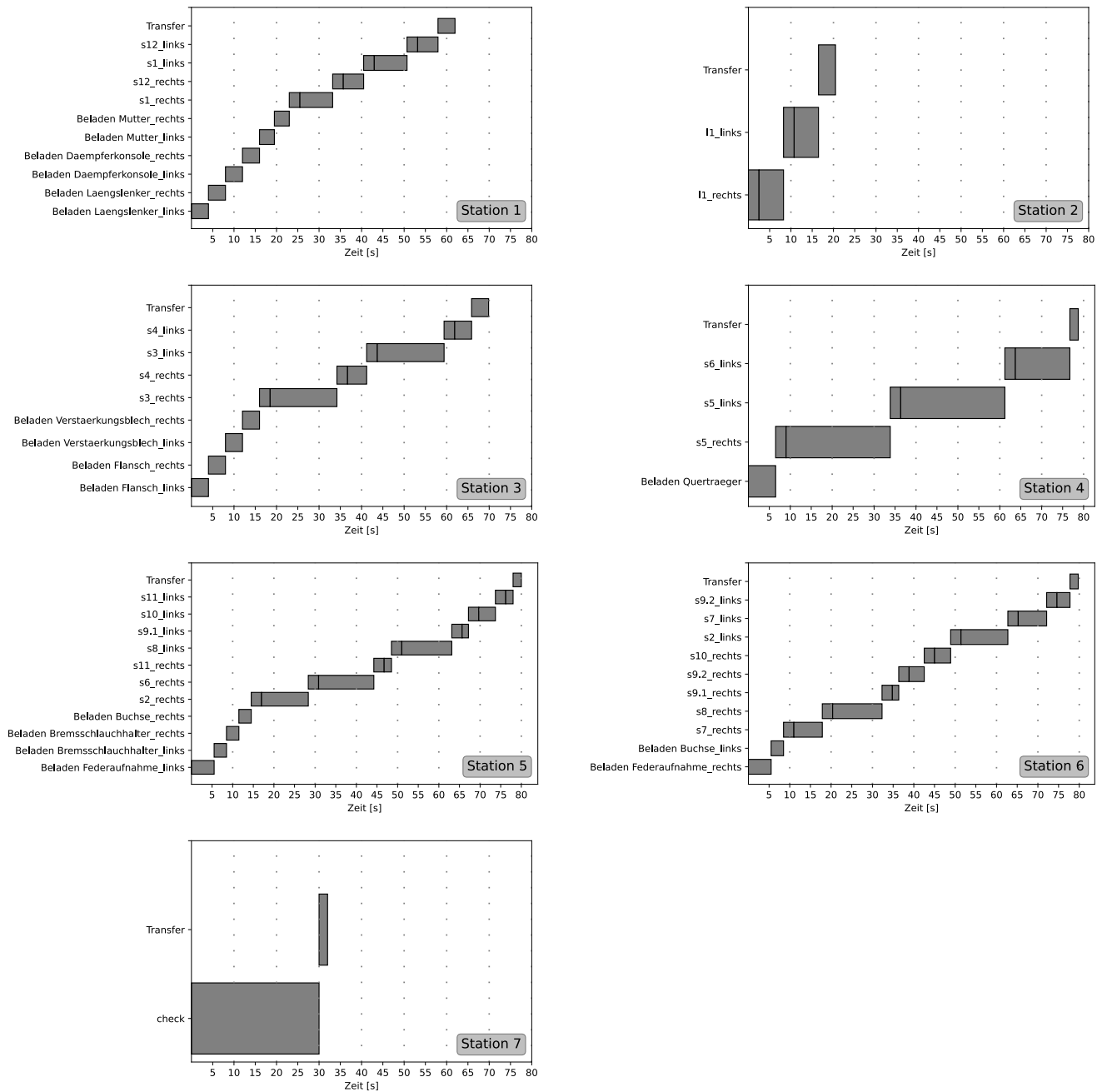


Abbildung A8.3: Belegung der resultierenden 7 Stationen bei exakter, einkriterieller Flächenminimierung (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).

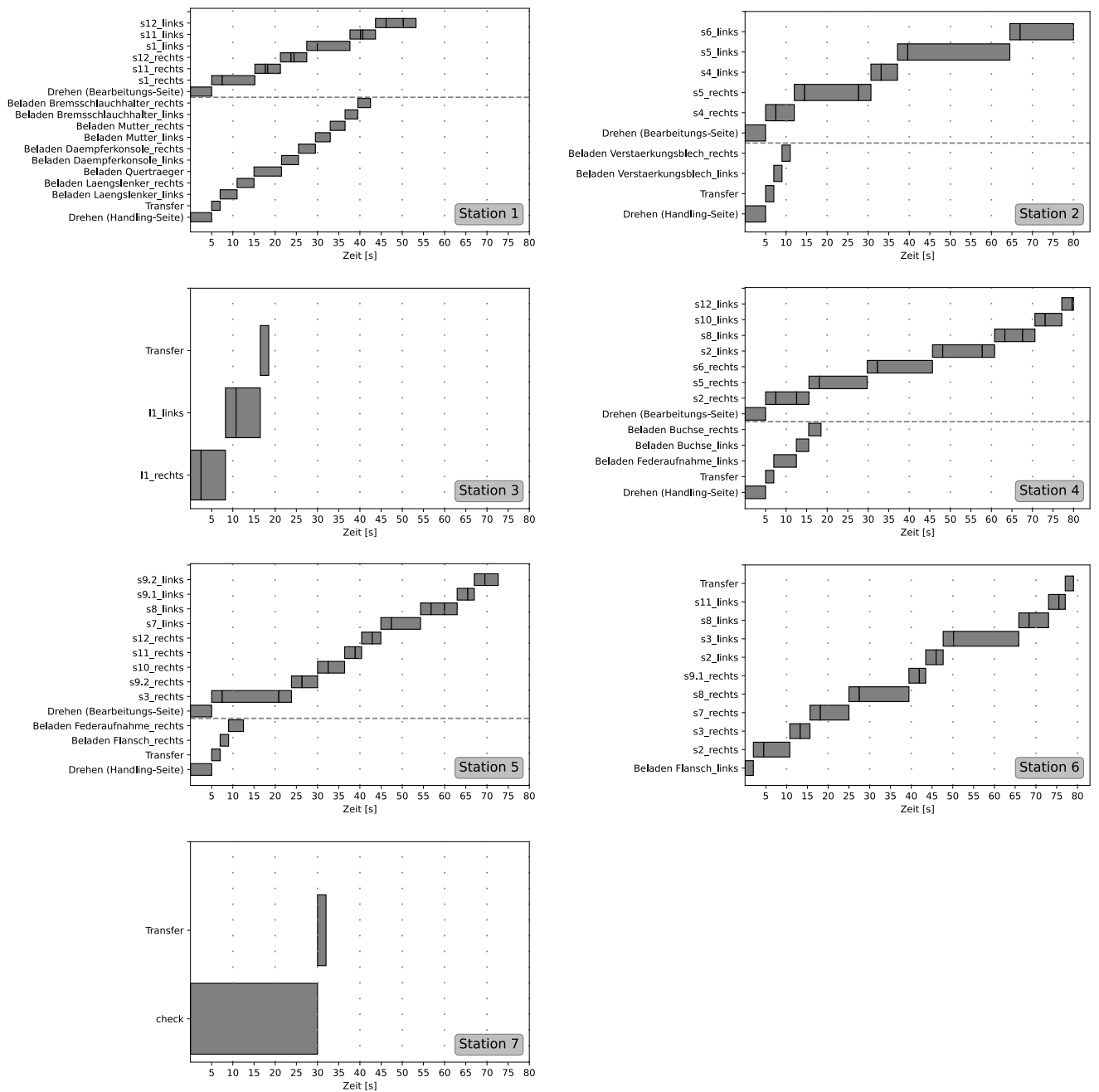


Abbildung A8.4: Belegung der resultierenden 7 Stationen bei exakter, einkriterieller Qualitäts-optimierung (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).

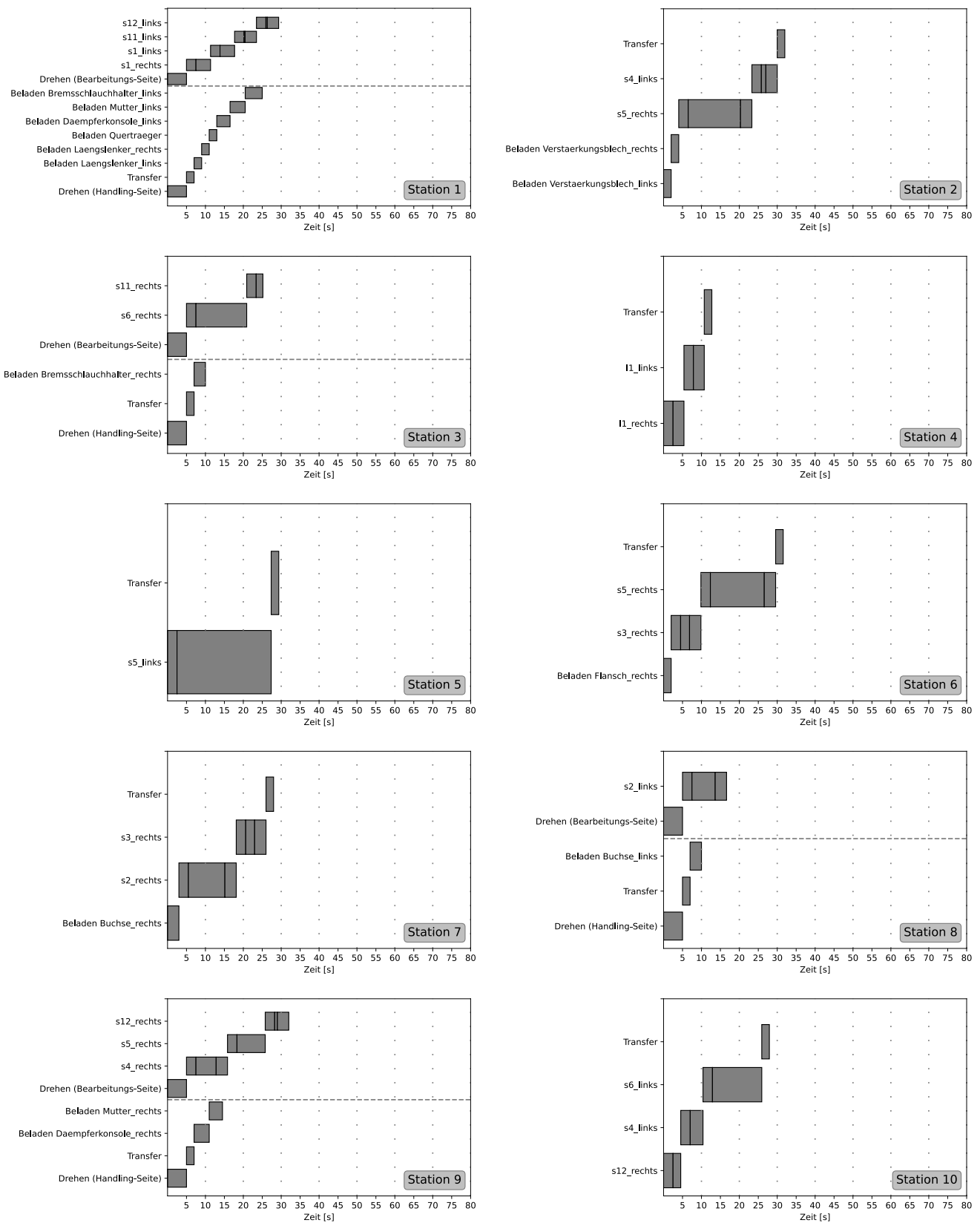


Abbildung A8.5: Teil 1 – Belegung der resultierenden 20 Stationen bei exakter, einkriterieller Maximierung der Taktzeitreserve (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).

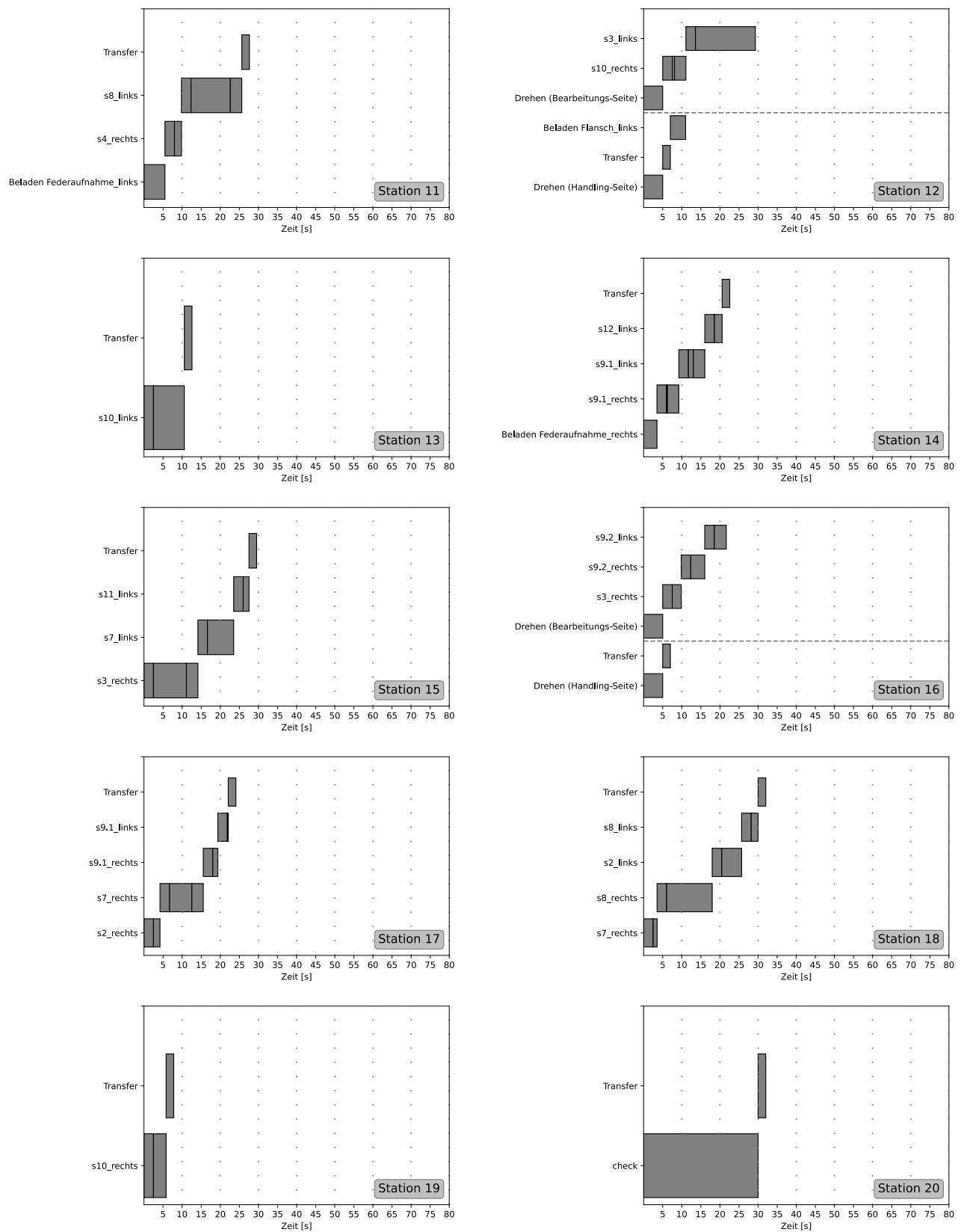


Abbildung A8.5: Teil 2 – Belegung der resultierenden 20 Stationen bei exakter, einkriterieller Maximierung der Taktzeitreserve (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).

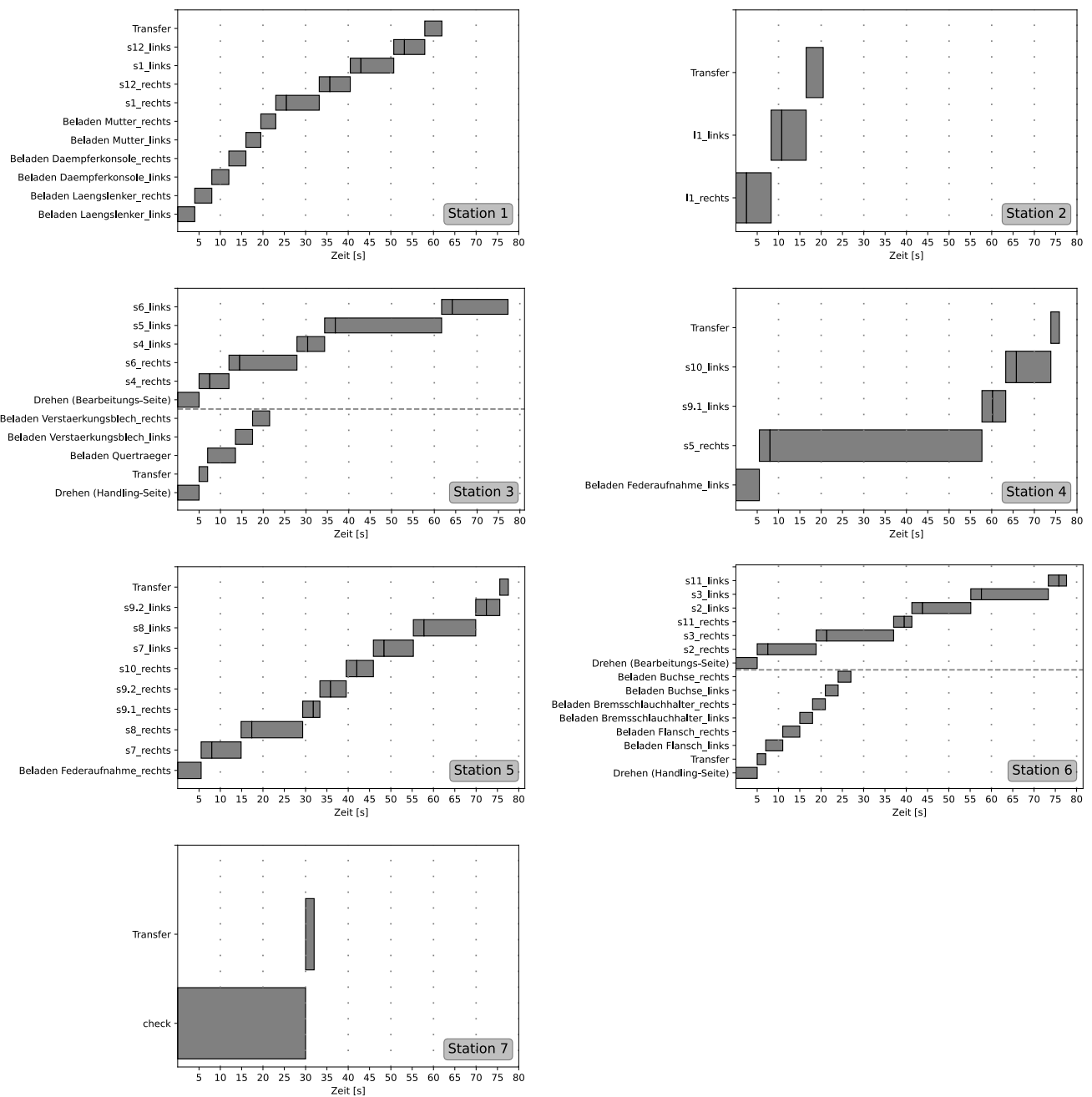


Abbildung A8.6: Belegung der resultierenden 7 Stationen bei exakter, multikriterieller Optimierung (eigene Darstellung in Anlehnung an Schäfer & Tse et al. 2025).

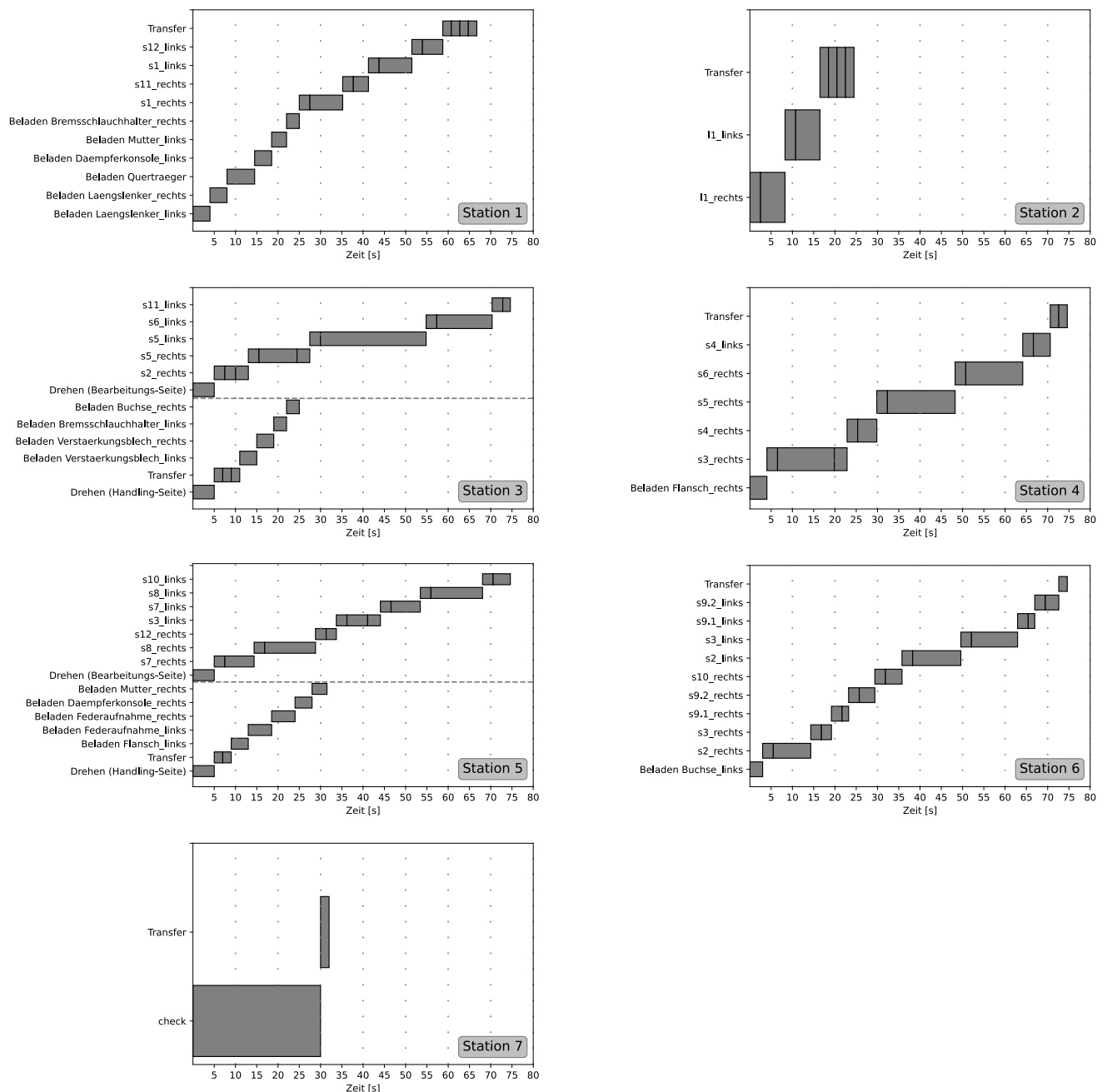


Abbildung A8.7: Belegung der resultierenden 7 Stationen bei exakter, multikriterieller Optimierung mit Modellerweiterung I (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schneider 2023).

Tabelle A8.7: Übersicht über die Ergebnisse bei umgekehrter Ordnungsrelation des 1. Erweiterungsmodells in Anlehnung an A_Schneider (2023).

	Stationen	Kosten	Fläche	Qualitätsindex	Taktzeitreserve	Laufzeit
	[1]	[Mio. €]	[m ²]	[1]	[s]	[s]
einkriteriell	Stationen	7	12,6736	15	0,00	124,13
	Kosten	7	11,3766	20	0,16	168,38
	Flächenbedarf	7	12,0062	19	0,61	102,11
	Qualität	7	12,9684	11	0,00	141,69
	Taktzeitreserve ¹	29	50,0314	46	48,00	221,00
multikriteriell	Optimum	7	11,3766	11	48,00	-
	absolut	7	11,5366	11	0,38	140,93
	Zielabweichung	0 %	1,41 %	0 %	-99,21 %	-

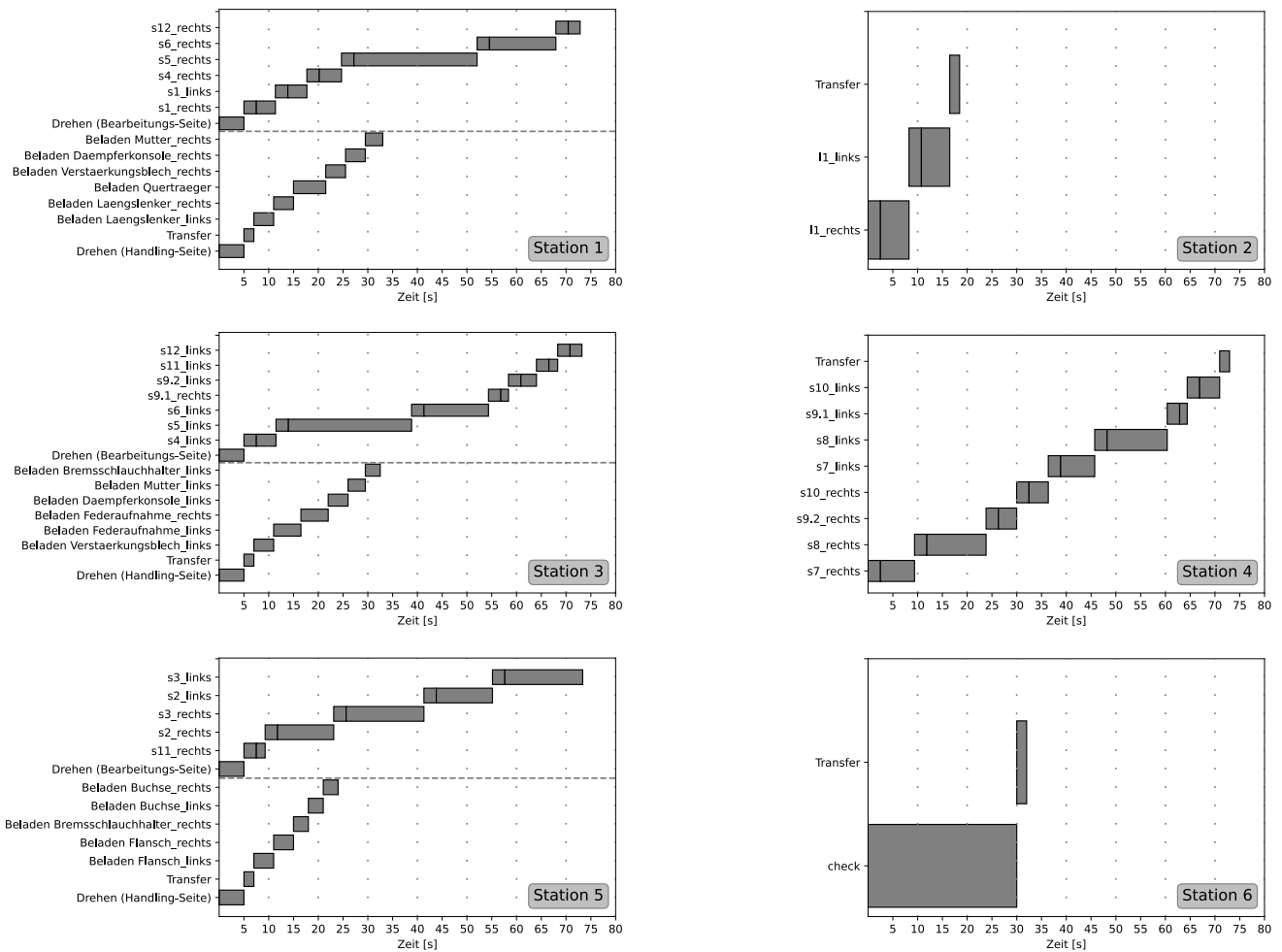


Abbildung A8.8: Belegung der resultierenden 6 Stationen bei exakter, multikriterieller Optimierung mit Modellerweiterung II (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Schukraft 2024).

A9 Anhang zu Kapitel 5.4 – Simulation

A9.1 Modulare 3D-Simulation zur Layoutplanung

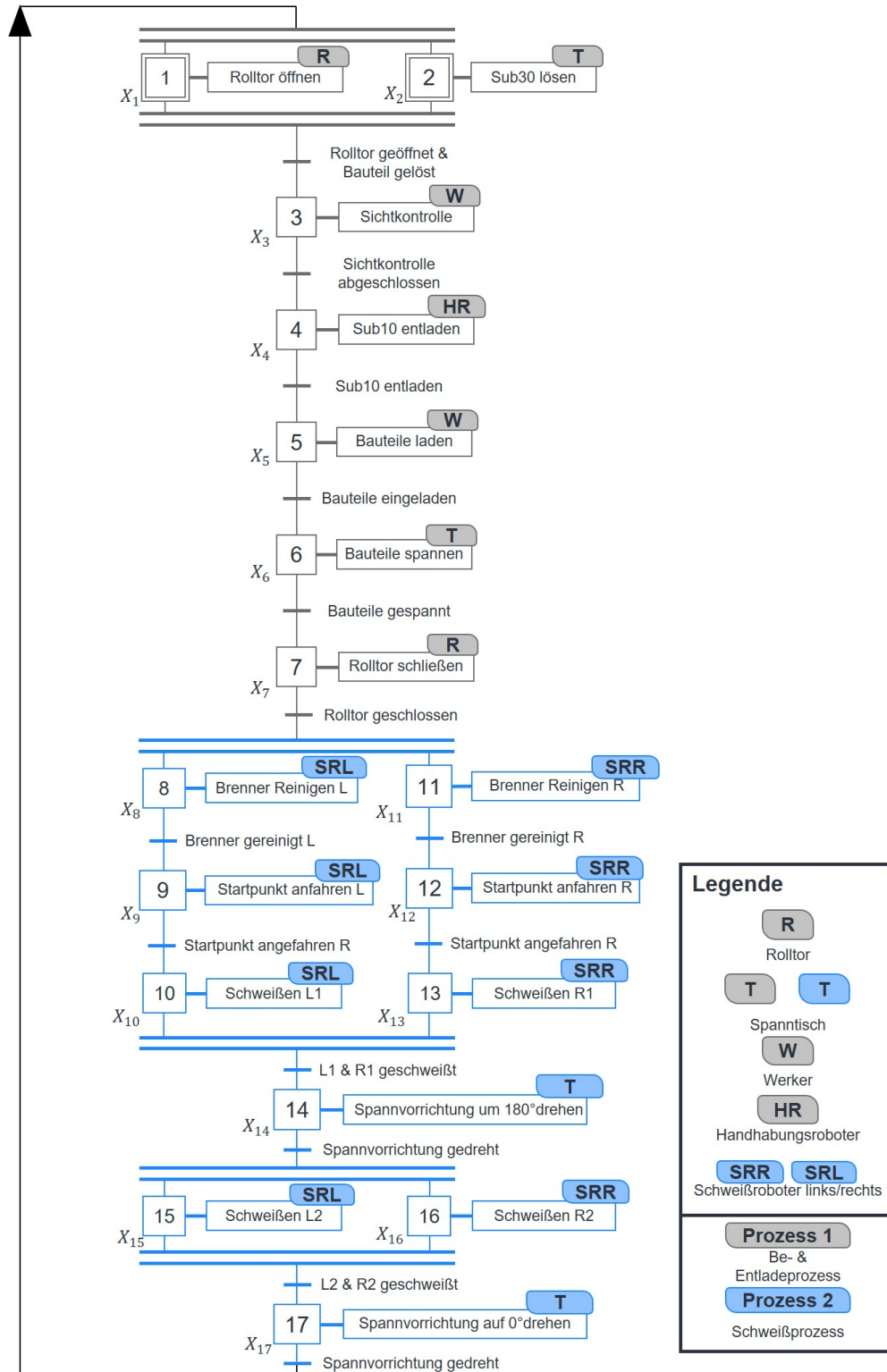


Abbildung A9.1: Grafcet Diagramm einer Orbit Cell (OC) im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).

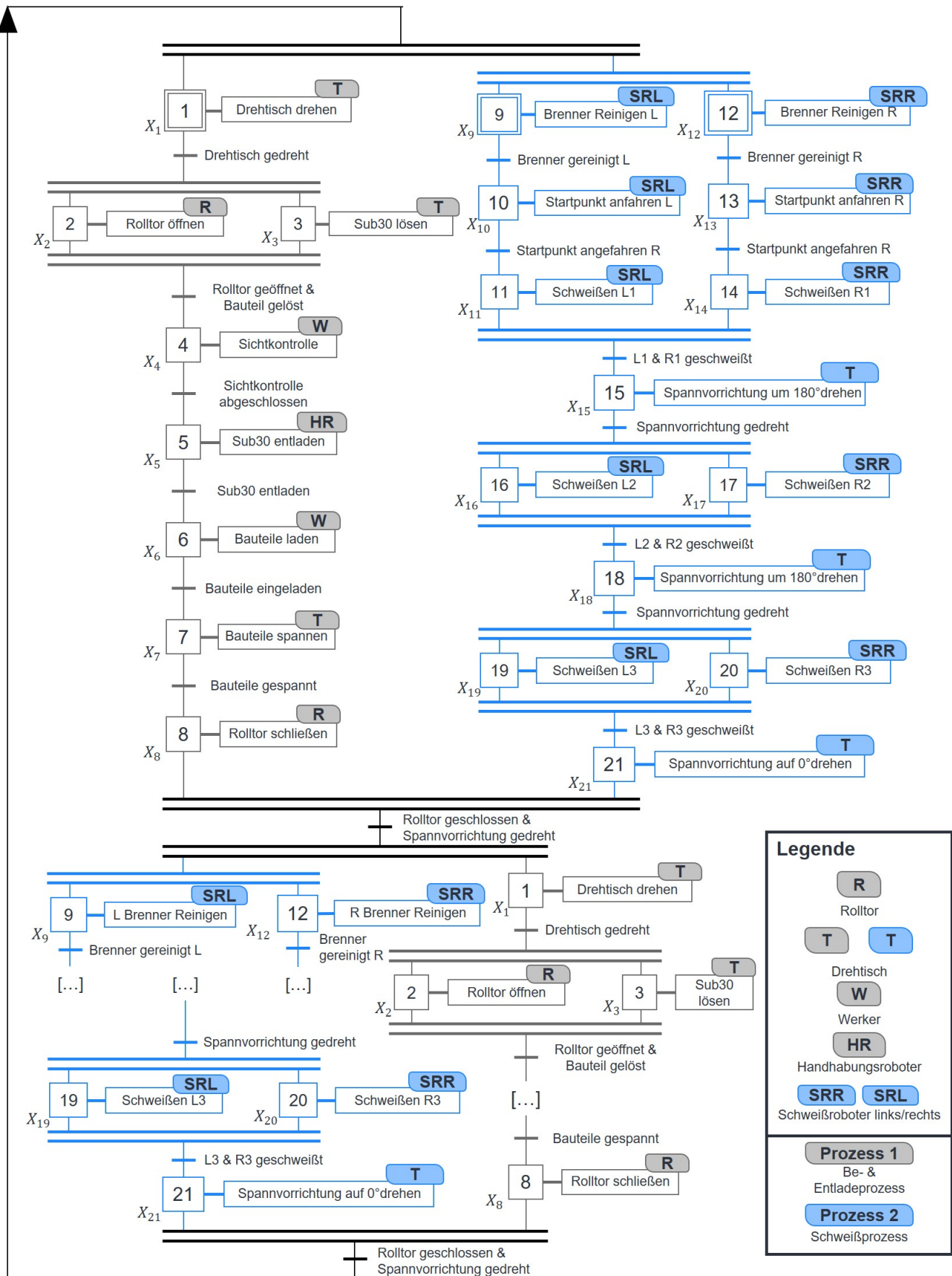


Abbildung A9.2: Grafcet Diagramm einer Turntable Cell (TC) im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).

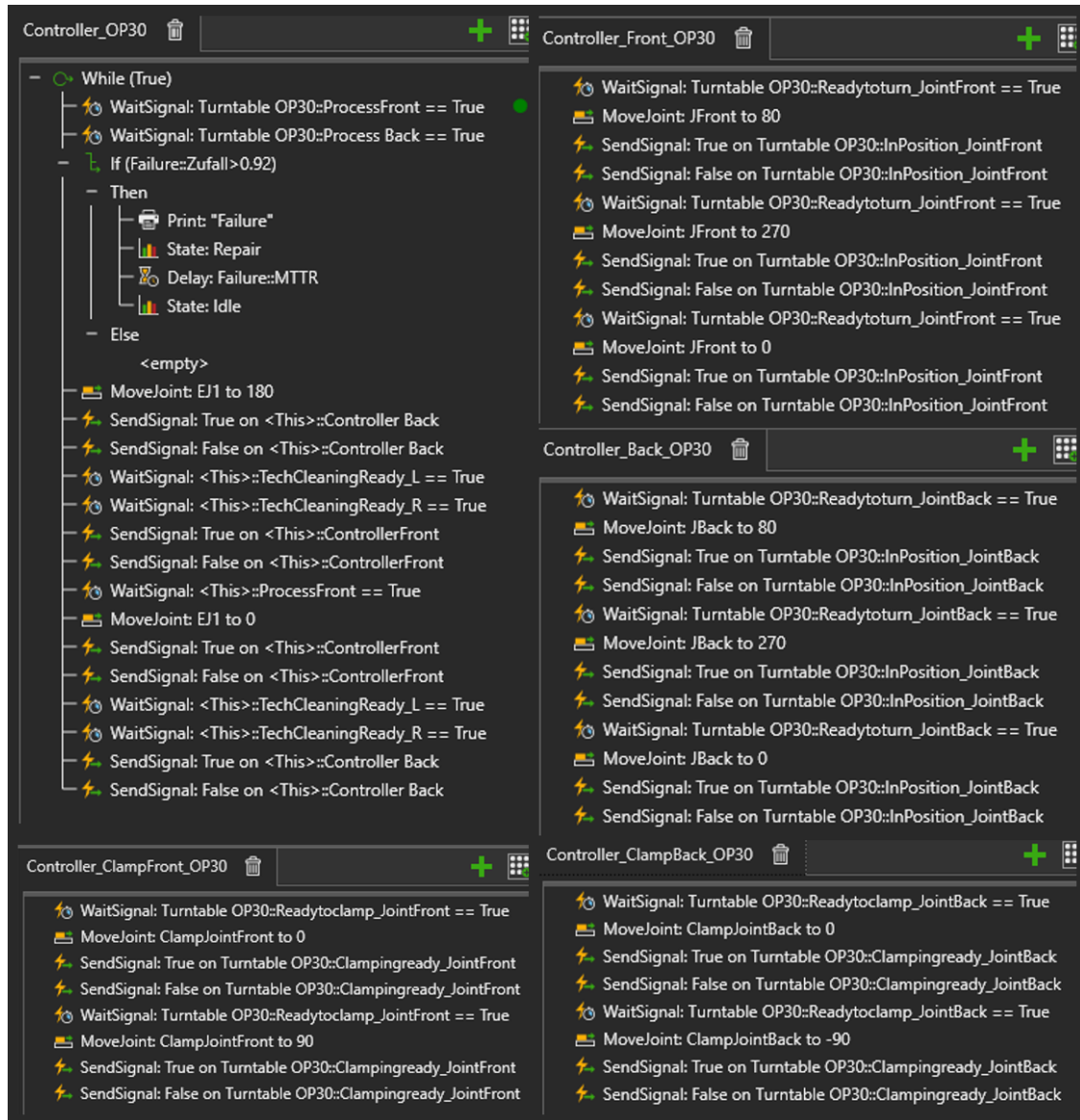


Abbildung A9.3: Visual Components Prozessablaufkonfiguration eines Drehtischs im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).



Abbildung A9.4: Visual Components Prozessablaufkonfiguration der Handhabungsseite im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).



Abbildung A9.5: Visual Components Prozessablaufkonfiguration der Bearbeitungsseite im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).

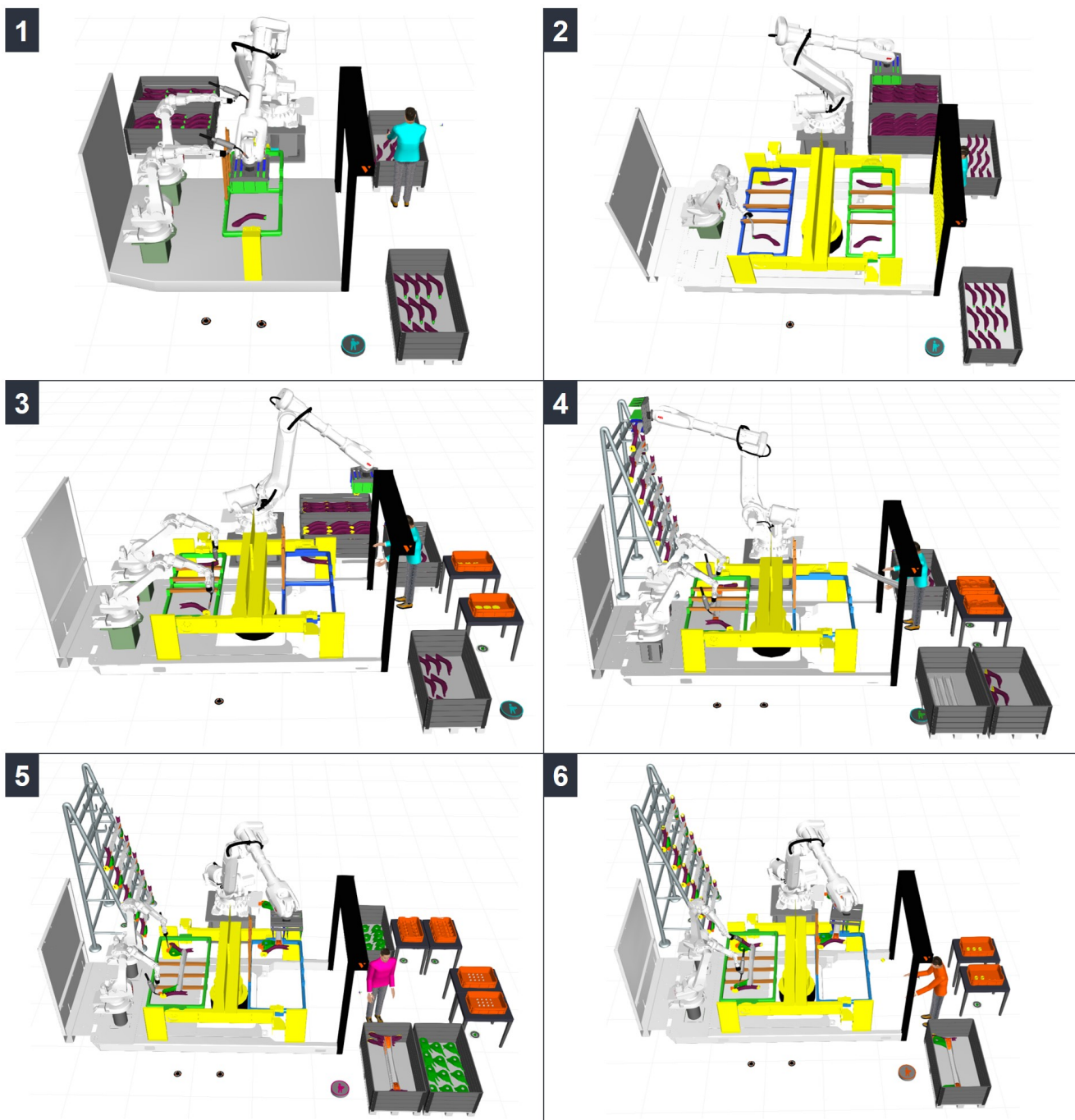


Abbildung A9.6: Stationen einer exemplarischen Linie im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).

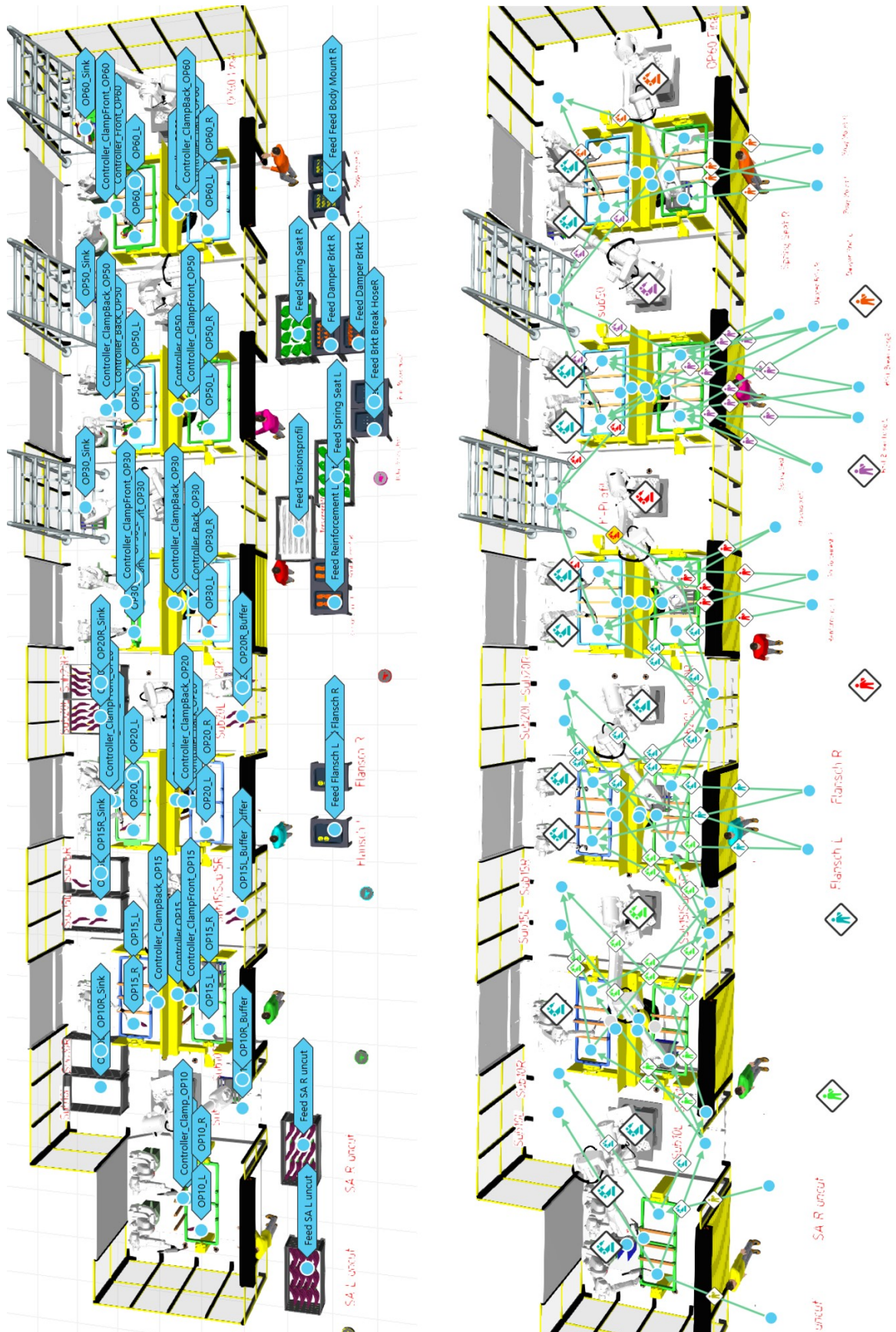


Abbildung A9.7: Prozessknoten (links) und Materialfluss (rechts) einer exemplarischen Linie im Anwendungsbeispiel (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Jung 2023).

A9.2 Modular skalierbare Ablaufsimulation zur Hochlaufplanung

Als Anwendungsbeispiel wird die Neuplanung eines Produktionssystems für die Herstellung von Induktivsensoren bei einem mittelständigen Zulieferer betrachtet. Das in Deutschland ansässige Unternehmen ist spezialisiert auf Sensor- und Automatisierungstechnik und produziert weltweit. In Abbildung A9.8 ist der geplante *Basiswertstrom* (BWS) des betrachteten Produktionssystems zur Sensorherstellung bei dem Zulieferer dargestellt.

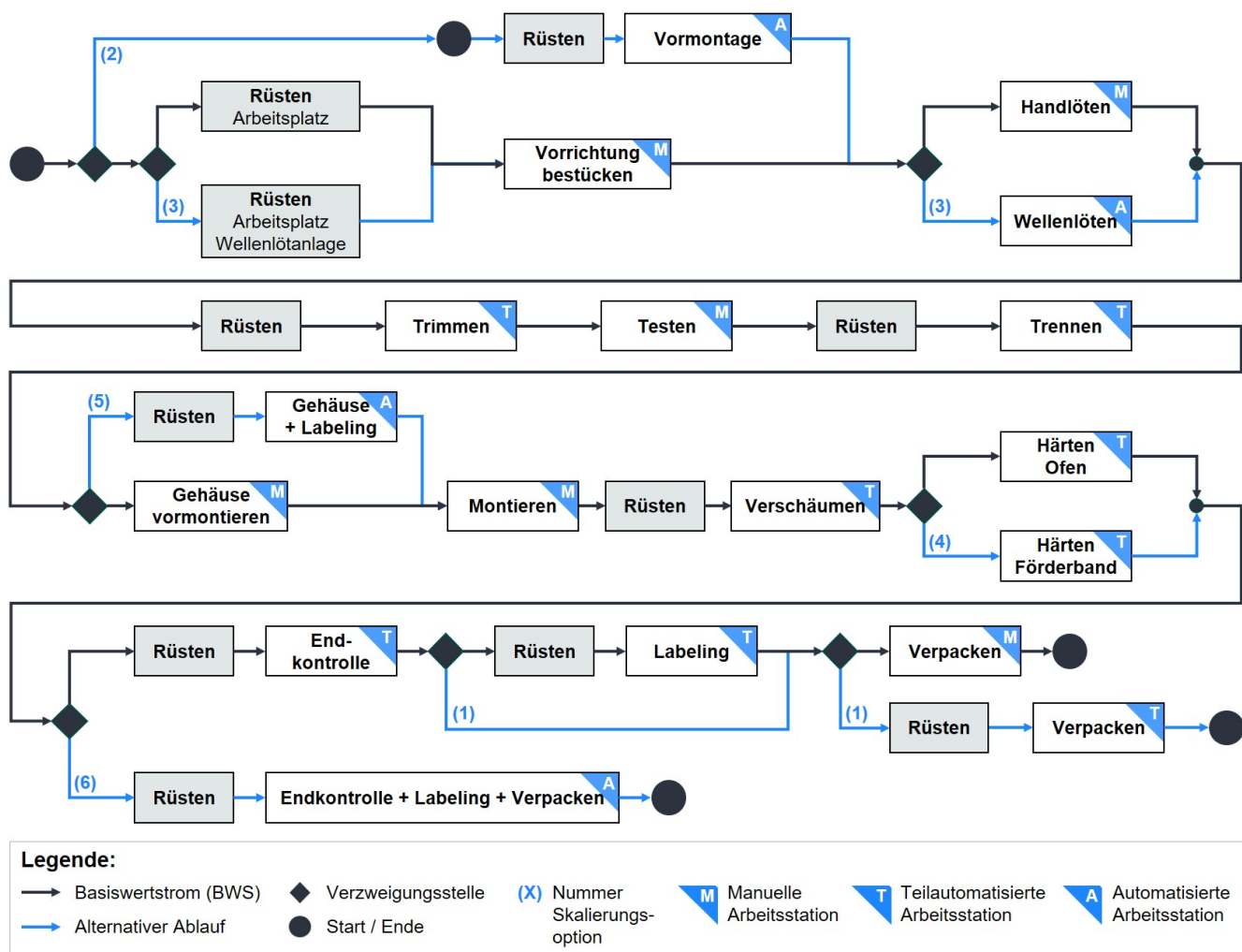


Abbildung A9.8: Basiswertstrom und mögliche Skalierungsoptionen (eigene Darstellung in Anlehnung an A_Zehner 2022).

Ausgehend von dem BWS (schwarz) werden für den Hochlauf des Produktionssystems insgesamt sieben verschiedene Skalierungsoptionen (blau) modelliert. Für eine bedarfsgerechte Dimensionierung des Systems können die Skalierungsoptionen individuell und kombiniert aktiviert werden. Details zur Auswirkung der Skalierungsoptionen können Tabelle A9.1 entnommen werden. Die Implementierung von BWS und Skalierungsoptionen als digitales Modell in Anylogic ermöglicht eine Initialisierung der gewünschten Linienkonfiguration (d. h. welche Skalierungsoptionen aktiv sind) über eine csv-Tabelle.

Tabelle A9.1: Skalierungsoptionen im Anwendungsbeispiel nach Schäfer & Klenk et al. (2024).

Nr.	Skalierungsoption	Auswirkung
(0)	BWS	
(1)	Teilautomatisierung Verpacken	Reduktion Zykluszeit und Personalbedarf
(2)	Automatisierung (Typ I) Lötén	Reduktion Zykluszeit und Personalbedarf
(3)	Automatisierung (Typ II) Lötén	s. o. – Handhabung manuell
(4)	Reduktion Puffer	Kontinuierlicherer Materialfluss
(5)	Automatisierung Labeling	Kombination mehrerer manueller Prozesse, Reduktion Zykluszeit und Personal-/Platzbedarf
(6)	Automatisierung Verpackung	Kombination mehrerer manueller Prozesse, Reduktion Zykluszeit und Personal-/Platzbedarf
(7)	Schichtmodell	Erhöhung der verfügbaren Produktionszeit

Dadurch lassen sich die Auswirkungen der Skalierungsoptionen auf das Systemverhalten und die resultierenden Stückkosten analysieren. Als Ergebnis der **Experimentdurchführung** (insgesamt 10.000 Simulationsexperimente) sind in Abbildung A9.9 verschiedene Hochlauf-szenarien mit unterschiedlich aktivierten Skalierungsoptionen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Einsatz von Automatisierungslösungen durch die Reduktion der Personalkosten von Vorteil ist. Diese machen im Anwendungsbeispiel den größten Anteil an den Stückkosten aus und steigen per Annahme jährlich um 4,5 %. Die sprunghaften Auswirkungen sind bei Punkt A besonders gut zu beobachten. Für hohe Stückzahlen kann der graue Korridor der vom Zulieferer vorgegebenen Ziel-Stückkosten durch die Aktivierung der Skalierungsoptionen dennoch unterschritten werden.

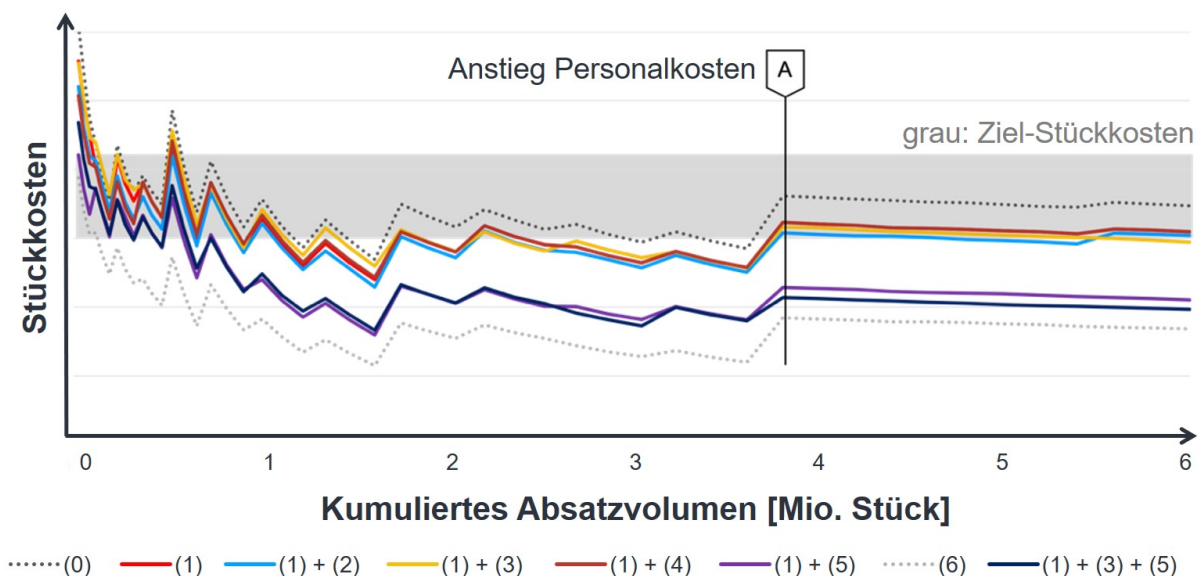


Abbildung A9.9: Stückkosten über den Produktionshochlauf abhängig von verschiedenen Skalierungsoptionen (eigene Darstellung nach Schäfer & Klenk et al. 2024).

Weiter erlaubt die Simulation eine Bewertung der Investitionen, wie es Abbildung A9.10 zeigt: Hier sind jeweils die minimalen und maximalen Stück-, Personal- und Investitionskosten über den Hochlauf aufgetragen. Die maximalen Personalkosten sind fast doppelt so hoch wie die notwendigen Investitionen. Mit dem steigenden Automatisierungsgrad der Skalierungsoptionen können die Personalkosten zwar reduziert werden, jedoch erhöht sich mit dem steigenden Fixkostenanteil das Verlustrisiko, sollte die prognostizierte Absatzmenge nicht eintreten. Für eine Diskussion verschiedener Absatzszenarien wird auf Schäfer & Klenk et al. (2024) verwiesen.

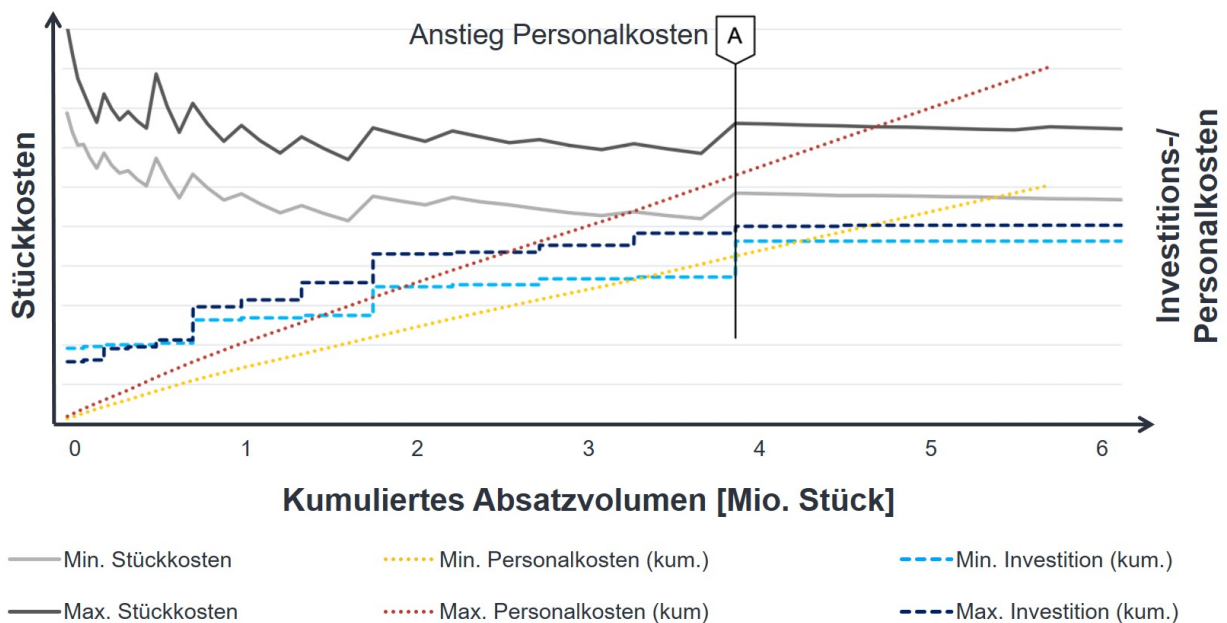


Abbildung A9.10: Vergleich von minimalen und maximalen Kosten (eigene Darstellung nach Schäfer & Klenk et al. 2024).

Diese dynamischen Analysen verdeutlichen den Vorteil der Nutzung digitaler Modelle in der frühen Phase der Grobplanung.

A10 Anhang zu Kapitel 5.5 – Validierung

Tabelle A10.1: Details der manuell geplanten Linienkonfiguration nach Schäfer & Tse et al. (2025).

	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4	Station 5	Station 6	Station 7
Stations-Typ	Schweißen	Laserschneiden	Schweißen	Schweißen	Schweißen	Schweißen	EOL Prüfen
OC / TC	TC	TC	TC	TC	TC	TC	OC
n Roboter	2	1	2	2	2	2	0
Beladen	Mensch	-	Mensch	Mensch	Mensch	Mensch	-
Transfer	Roboter	Mensch	Mensch	Roboter	Roboter	Roboter	Roboter
Arbeitszeit Station¹ [s]	15,40	11,48	62,80	160,06	96,63	85,76	30,00
Arbeitszeit Roboter² [s]	7,70	11,48	31,40	80,03	48,32	42,88	30
Zykluszeit Station³ [s]	12,70	16,48	35,40	85,03	53,32	47,88	30
Überlappung	-	-	-	-	2	2	-

¹Arbeitszeit der Station = Summe der Bearbeitungszeiten aller Aufgaben an einer Station

²Arbeitszeit je Roboter = Arbeitszeit der Station / n Roboter

³Zykluszeit der Station = Arbeitszeit je Roboter + Zeit zum Drehen des Drehtischs (bei TC)

Taktzeit der Linie = maximale Zykluszeit

A11 Anhang zu Kapitel 6.1 – Diskussion

Tabelle A11.1: Vergleich der Softwareanbieter in Anlehnung an A_Beck (2022).

Funktion	Visual Components ¹	Plant Simulation ²	AnyLogic ³	PolyVR ⁴
Konfiguration 3D-Layout	X	X	X	X
Prozessmodellierung	X	X	X	X
eCatalog	X	X	X	X
Import von <i>Computer-Aided Design</i> (CAD) Dateien	X	X	X	X
CAD Attribute Reader	X	X	X	X
Import Punktwolken	X	X		X
Import von 2D-Zeichnungen und Stücklisten	X	X	X	X
Komponentenmodellierung	X	X		X
Grundlegende Geometrien	X	X	X	X
Geometrievereinfachung	X	X	X	X
Darstellung der Schweißnaht	X			X
Bahnprogrammierung	X	X	X	X
Kalkulation von Statistiken	X	X	X	X
Schnittstelle <i>speicherprogrammierbare Steuerung</i> (SPS)	X	X	X	X
Schnittstelle <i>Extensible Markup Language</i> (XML)	X	X	X	X
Schnittstelle Excel	X	X	X	X
Anbindung Visual Studio	X	X		
Anbindung Fanuc Roboter	X	X	X	X
Anbindung Siemens S7	X	X	X	X
<i>Virtual Robot Controller</i> (VRC) für <i>Universal Robots</i> (UI) und Stäubli	X	X	X	X
<i>Graphical User Interface</i> (GUI)	X	X	X	X

¹Siehe Kapitel 5.4.1 Schäfer & Freund (2024)

²Siehe Kapitel 3.2.1 Stoll (2017)

³Siehe Kapitel 5.4.2 Schäfer & Klenk et al. (2024)

⁴Siehe Kapitel 3.2.5 Gönzheimer & Kimmig et al. (2019)

Forschungsberichte aus dem wbk
Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünfsichtigen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montage system

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme:
Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung
im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch
Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung
in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der
Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische
Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge
zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer
Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl. WirtschaftsIng. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspanprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmer

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

**Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren
Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung**

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossman

**Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitäts-
methodenverbund und Qualitätsmethodenintegration**

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

**Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer
Honprozessregelung**

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

**Optimierung der Fünfsachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlen-
unterstützte CAM-Umgebung**

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmäzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Managment-Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser
Abrasivstrahlschneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des
Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen
Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in
Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungs-
organisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels
Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

Development of a database to consider multi wear mechanisms within chip forming simulation

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für µMIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptronischen Kugelgewindetrieben

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauß

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen
Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner
Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel
der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten
Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess
und Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourcen-
effizienter Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren

ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken
Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme
Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning
Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation
Prozesseinflüsse und Prozessauslegung

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotexturierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschälen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken
Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetriebspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälzgewindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

In-Process Porositätserkennung für den PBF-LB/M-Prozess

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

Intelligent production control for time-constrained complex job shops

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönzheimer

Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 281

Dr.-Ing. Oliver Brützel

Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks

Development of a Digital Twin for Product Allocation and Robust Line Configuration

Band 282

Dr.-Ing. Gregor Graf

Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl im LPBF-Prozess unter Verwendung einer Doppellaser-Belichtungsstrategie

Band 283

Dr.-Ing. Maximilian Torsten Halwas

Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 284

Dr.-Ing. Magnus Kandler

Menschzentriertes Implementierungsvorgehen für das Digitale Shopfloor Management - Förderung der Selbstorganisation unter Berücksichtigung der Mitarbeiterakzeptanz

Band 285

Dr.-Ing. Michael Baranowski

Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess

Maschinentechnik, Prozessentwicklung und -modellierung

Band 286

Dr.-Ing. Tobias Storz

Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-Ionen-Pouchzellen

Agile Anlagentechnik für die Prozesskette Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

Band 287

Dr.-Ing. Nikolas Sven Matkovic

Additive Individualization of Continuous-Discontinuous Reinforced Thermoplastics

Band 288

Dr.-Ing. Marco Wurster

Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing

Band 289

Dr.-Ing. Felix Johannes Wirth

Prozessgeregelte Formgebung von Hairpin-Steckspulen für elektrische Traktionsmotoren

Band 290

Dr.-Ing. Patrizia Konstanze Gartner

Konzept eines Selbstheilungsmechanismus für Polymerelektrolytmembranen

Optimierung der Lebensdauer und der Effizienz von Brennstoffzellen

Band 291

Dr.-Ing. Jens Schäfer

Funktionsintegriertes Handhabungssystem zur geometrieflexiblen, positionsgenauen Einzellagenstapelung in der Brennstoffzellenstackfertigung

Band 292

Dr.-Ing. Gwen Louis Steier

Strategischer Fit in globalen Produktionsnetzwerken

Entscheidungsunterstützung für die strategische Netzwerkkonfiguration

Band 293

Dr.-Ing. Louis Schäfer

Assistierte, modellbasierte Grobplanung von Produktionssystemen mittels Mehrzieloptimierung:

Anwendung am Beispiel hochautomatisierter Schweißlinien für die Automobilzuliefererindustrie