

Methodik zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen im Kontext Cyber-physischer Produktionssysteme

Patrick Werner Voit

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Die Dissertation wurde am 05.04.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 25.11.2024 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes und damit die Sicherheit der Arbeitsplätze hängen entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des iw b ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen sowie von Nachhaltigkeitsaspekten entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in alle Planungs- und Entwicklungsprozesse spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des iw b. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Die Steuerung und der Betrieb von Produktionssystemen, die Qualitätssicherung, die Verfügbarkeit und die Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den Forschungsberichten des iw b werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des Institutes veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und den Anwendenden zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV in Augsburg sowie am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die wohlwollende Unterstützung und kontinuierliche Förderung dieser Arbeit. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) und Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub, dem Leiter des Lehrstuhls für Produktionstechnik und Energiespeichersysteme, für die Übernahme des Korreferats bzw. des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich besonders bei Dr.-Ing. Eric Unterberger, Dr.-Ing. Christian Gebbe und Martin Zäpfel für die fachlichen Diskussionen, die wertvollen Hinweise und die gründliche Durchsicht meiner Arbeit. Außerdem gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen der Institute sowie den Studierenden, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben.

Schließlich möchte ich mich sehr herzlich bei meiner Partnerin, meinen Freunden und meiner Familie bedanken, da ohne deren bedingungslosen Rückhalt und großartigen Unterstützung diese Arbeit sicherlich nicht möglich gewesen wäre.

München, März 2024

Patrick Voit

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Verzeichnis der Formelzeichen.....	XII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung.....	3
1.3 Zielsetzung	4
1.4 Forschungsmethodischer Rahmen und Aufbau der Arbeit	6
2 Grundlagen.....	9
2.1 Veränderungsfähige Produktionssysteme	9
2.1.1 Grundzüge von Produktionssystemen	9
2.1.2 Veränderungsfähigkeit im Produktionssystem.....	12
2.1.3 Wandlungsfähigkeit und Flexibilität	14
2.1.4 Rekonfigurierbarkeit und Umrüstbarkeit	16
2.1.5 Modularisierung von Produktionssystemen	17
2.2 Cyber-physische Produktionssysteme (CPPS)	19
2.2.1 Allgemeines zur CPPS-basierten Fertigungsautomatisierung.....	19
2.2.2 Fertigungssystem mit CPPS-Strukturen.....	21
2.2.3 CPPS-basierte Steuerungs- und Kommunikationsstruktur	23
2.2.4 Intelligente Objekte im CPPS.....	26
2.2.5 Rekonfigurierbare Fertigungszellen in CPPS-Strukturen	29

2.3	Planung modularer, skalierbarer Produktionssysteme.....	31
2.3.1	Allgemeines zur Produktionssystemplanung	31
2.3.2	Lebenszyklusorientierte Grobplanung	33
2.3.3	Modellbasierte, technische Auslegung.....	35
2.3.4	Kapazitätsbezogene Auslegung	37
2.3.5	Kosten- und Leistungsbewertung.....	38
2.4	Fazit.....	40
3	Stand der Forschung	41
3.1	Planung veränderungsfähiger Produktionssysteme	41
3.1.1	Planung modularer, skalierbarer Produktionssysteme	41
3.1.2	Weitere Planungsansätze.....	44
3.1.3	Fazit.....	47
3.2	CPPS-spezifische Gestaltung von Produktionssystemen	48
3.2.1	CPPS-spezifische Produktionssystemplanung	48
3.2.2	Weitere CPPS-spezifische Ansätze.....	51
3.2.3	Fazit.....	53
3.3	Modellierung von Produktionssystemen	54
3.3.1	Modelle in der Produktionssystemplanung.....	54
3.3.2	Weitere CPPS-relevante Modelle	58
3.3.3	Fazit.....	60
3.4	Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfs.....	60
4	Anforderungsbezogene Konzeption der Methodik	63
4.1	Anforderungen an die Methodik.....	63
4.1.1	Allgemeine Anforderungen.....	63

4.1.2	Inhaltsspezifische Anforderungen	64
4.1.3	Anwendungsspezifische Anforderungen.....	66
4.2	Überblick zum Aufbau der Methodik	66
4.3	Fazit.....	68
5	Modellbasierte Deskription und Konfiguration	69
5.1	Produkt-Prozess-Ressourcen-Datenmodell.....	69
5.1.1	Produktmodell	70
5.1.2	Prozessmodell.....	74
5.1.3	Ressourcenmodell.....	80
5.2	Konfigurationsmodellierung von Fertigungszellen	90
5.2.1	Fertigungszellstrukturierung	92
5.2.2	Betriebsmitteleignungsabgleich	94
5.2.3	Zellkonfigurationskomposition	97
5.2.4	Kapazitätsbezogene Auslegung.....	101
5.2.5	Rekonfiguration.....	104
5.3	Fazit.....	106
6	Methodisches Planungsvorgehen	107
6.1	Übersicht zum methodischen Vorgehen	107
6.2	Analyse der Rahmenbedingungen	108
6.2.1	Betrachtung der Randbedingungen	109
6.2.2	Präzisierung der Planungsanforderungen.....	110
6.2.3	Festlegung der Planungsziele	112
6.3	Gestaltung der Ausbaustufenkonzepte.....	114
6.3.1	Definition der Veränderungsstrategie	115

6.3.2	Erarbeitung alternativer Ausbaustufenkonzepte	117
6.3.3	Ableitung und Absicherung von Ausbaustufenfolgen	120
6.4	Bewertung der Ausbaustufenkonzepte	122
6.4.1	Leistungsbewertung	123
6.4.2	Kostenbewertung.....	124
6.4.3	Gesamtbewertung und Auswahl	126
6.5	Fazit.....	127
7	Anwendung und Bewertung der Methodik.....	129
7.1	Beschreibung des Anwendungsfalls	129
7.1.1	Anwendungsszenario	129
7.1.2	Betrachtetes Fertigungssystem.....	130
7.1.3	Betrachtete Produktionsprozesse	131
7.2	Anwendung der Methodik	133
7.2.1	Analyse der Rahmenbedingungen.....	133
7.2.2	Gestaltung der Ausbaustufenkonzepte	135
7.2.3	Bewertung der Ausbaustufenkonzepte.....	147
7.2.4	Diskussion der Ergebnisse	150
7.3	Bewertung der Methodik	152
7.3.1	Anforderungsbezogene Bewertung.....	152
7.3.2	Wirtschaftliche Bewertung.....	155
7.3.3	Kritische Reflexion	159
7.4	Fazit.....	160
8	Schlussbetrachtung.....	161
8.1	Zusammenfassung	161

8.2 Ausblick	163
Literaturverzeichnis.....	165
Anhang	204
A1 Intelligenzbezogene Kompatibilitätsmatrix	204
Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	205

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
A	Ausprägung
AA	Assistiert automatisiert
AG	Ausgelagert
AK	Aktiv
Ak	Aktorik
AL	Automatisierungsleistungsstufe
AMS	Agent Management System
AP	Automatisierungsprofil
AS	Automatisierungsstufen
ASK	Ausbaustufenkonzept
AU	Automatisiert
BF	Bauteilfamilie
BM	Betriebsmittel
BMK	Betriebsmittelkonfiguration
BSTV	Bauteilstrukturvariante
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CPPS	Cyber-physisches Produktionssystem
CPPS-L	CPPS-Leistungsstufe

Abkürzungsverzeichnis

CPS	Cyber-physisches System
D	Dezentral
DA	Datenanalyse
DB	Datenbereitstellung
DF	Directory Facilitator
DH	Datenhaltung
DI	Dateninterpretation
DPS	Dediziertes Produktionssystem
DRM	Design Research Methodology
DÜ	Datenübertragung
EA	Erweitert automatisiert
EG	Eingebettet
EI	Einheit
EP	Entstehungsphase
ERP	Enterprise Ressource Planning
Ev	Energieversorgung
F	Fähigkeit
FA	Funktionsausführung
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
FM	Fertigungsmodul
FPS	Flexibles Produktionssystem
GA	Grundlegend automatisiert
GEM	Geometrisches Merkmal
GO	Grundoperation

HMI	Human Machine Interface
H/VA	Hoch- und vollautomatisiert
IA	Automatische Informationsableitung
ID	Identifikationsfähigkeit
Id	Identifikator
IF	Intelligente Funktion
IoT	Internet of Things
IP	Intelligenzprofil
IS	Informationsspeicherung
IuK-Technologie	Informations- und Kommunikationstechnologie
IV	Informationsverarbeitung
K	Kombiniert
KC	Keine CPPS-Einbindung
KE	Kein/e
KO	Kommunikationsfähigkeit
KS	Kommunikationssystem
Ks	Kommunikationsschnittstelle
LBM	Laser Beam Melting
LO	Lokalisierbarkeit
M	Modul
MAS	Multi-Agenten-System
MES	Manufacturing Execution System
MO	Monitoring
MTS	Message Transport System

Abkürzungsverzeichnis

N	Nutzer
NA	Nicht automatisiert
NI	Nutzerinteraktion
NP	Nutzungsphase
NR	Nutzerrückmeldung
OEE	Overall Equipment Efficiency
OI	Objektinformationsspeicherfähigkeit
ORM	Organisatorisches Merkmal
PA	Passiv
PDM	Produktmerkmal
PDM-System	Produktdatenmanagementsystem
PLM-System	Product-Lifecycle-Management-System
PPR	Produkt-Prozess-Ressource
PT	Personentag
PZM	Prozessmerkmal
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
RP	Rekonfigurationsphase
RPS	Rekonfigurierbares Produktionssystem
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SE	Selbstständige Entscheidungsfähigkeit
Se	Sensorik
SI	Systeminteraktion
SK	Selbstkonfiguration

SO	Spezifische Operation
SOA	Serviceorientierte Architektur
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SS	Steuerungsstruktur
ST	Station
Stk.	Stück
StMWi	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie
Sz	Szenario
TM	Transportmodul
TEM	Technologisches Merkmal
UE	Umwelterfassung
UM	Umweltmanipulation
VP	Verwertungsphase
WS	Wertschöpfungsschritte
Z	Zentral
ZE	Zustandserfassung
ZK	Zellkonfiguration
ZM	Zuführmodul

Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
A_i	Tage / Jahr	Anzahl Arbeitstage Betriebsmitteltyp i
GF	%	Gewichtungsfaktor
K	€	Kosten
KW	-	Kostenwertigkeit
KBW	€	Kostenbarwert
KEW	-	Kostenbezogene Einzelwertigkeit
KGW	-	Kostenbezogene Gesamtwertigkeit
l_{mj}	Lose / Jahr	Losanzahl für Produkttyp j
LEW	-	Leistungsbezogene Einzelwertigkeit
LGW	-	Leistungsbezogene Gesamtwertigkeit
LW	-	Leistungswertigkeit
m_{ji}	Stück / Jahr	Ausbringungsmenge für Produkttyp j auf Betriebsmitteltyp i
m_{jL}	Stück / Los	Losgröße für Produkttyp j
NW	-	Nutzwert
η_i	-	Zeitnutzungsgrad für Betriebsmitteltyp i
P	%	Eintrittswahrscheinlichkeit
PW	-	Punktwert
R	€	Restwert
S_i	-	Schichtanzahl für Betriebsmitteltyp i
t_{bji}	min / Stück	Bearbeitungszeit für Produkttyp j auf Betriebsmitteltyp i

Verzeichnis der Formelzeichen

t_i	min / Tage · Schicht	Vorhandene Einsatzzeit für Betriebsmitteltyp i je Tag und Schicht
t_{rji}	min / Jahr	Rüstzeit für Produkttyp j auf Betriebsmitteltyp i
T_{KA_i}	min / Jahr	Vorhandene (verplanbare) Belegungszeit für Betriebsmitteltyp i
T_{KB_i}	min / Jahr	Erforderliche Belegungszeit für Betriebsmitteltyp i
TNW	-	Teilnutzwert

Hinweis: In dieser Arbeit wird nur die männliche Sprachform verwendet. Dies dient lediglich der Beibehaltung eines hohen Maßes an Lesbarkeit. Sämtliche Bezeichnungen gelten jedoch ausdrücklich gleichermaßen für alle Geschlechter.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Am Industriestandort Deutschland trägt, wie in keiner anderen entwickelten, westlichen Volkswirtschaft, das produzierende Gewerbe einen substanziellen Beitrag zur Wirtschaftsleistung bei (ABELE & REINHART 2011). Die produzierende Industrie sieht sich jedoch verschiedenen globalen Trends (vgl. z. B. ABELE & REINHART 2011, MAZUR 2023) ausgesetzt. Unter anderem gelten die zunehmende Verkürzung von Produktlebenszyklen und steigende Nachfrage nach Individualisierung von Produkten als wesentliche Treiber eines turbulenten Unternehmensumfelds (ABELE & REINHART 2011, SCHENK ET AL. 2014). Damit produzierende Unternehmen erfolgreich in diesem Umfeld bestehen können, sind sie gezwungen, ihr Leistungsangebot gezielt gegenüber den Wettbewerbern zu differenzieren (REINHART & ZÄH 2003, PILLER 2006). Die damit einhergehende **Einzel- und Kleinserienfertigung** individueller Produkte führt zu höherer Variantenvielfalt und kleineren Losgrößen bis zur Stückzahl 1 je Variante (GRÄBLER 2004, PILLER 2006, GÜNTNER ET AL. 2006, KOREN 2010, BAUERNHANSL 2017).

Infolgedessen steigt die Komplexität und Dynamik in der Fertigung stark an (GRÄBLER 2004, BAUERNHANSL 2017). Neben vermehrten Rüst- und Umbauaufwänden treten sprunghafte Produktionsparameteränderungen bei gleichzeitig abnehmender Vorhersagbarkeit von Veränderungen auf, was zu sinkender Produktivität und damit abnehmender Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens führen kann (BAUERNHANSL 2017, HAMMERSTINGL 2020). Um mit geeigneten Maßnahmen schnell und aufwandsarm zu reagieren, bedarf es Produktionssysteme, die im Sinne der **Veränderungsfähigkeit** über Flexibilität und Wandlungsfähigkeit verfügen (WIENDAHL ET AL. 2007, HEINEN ET AL. 2008, BAUERNHANSL 2017). Während mit der Flexibilität Anpassungen ausschließlich innerhalb eines definierten Korridors geschehen, finden strukturelle Anpassungen jenseits vorgehaltener Flexibilitätsskorridore über die Wandlungsfähigkeit statt (WIENDAHL ET AL. 2007, HEINEN ET AL. 2008). Die Rekonfigurierbarkeit dient dabei als Fähigkeit zur schnellen Anpassung einzelner Funktionselemente (KOREN ET AL. 1999, WIENDAHL ET AL. 2014).

Zur Verwirklichung hochflexibler und wandlungsfähiger Produktionsstrukturen entstehen im Kontext der Industrie 4.0-Initiative, die den Wandel hin zur vernetzten und digitalisierten Produktion beschreibt, sogenannte **Cyber-physische Pro-**

duktionssysteme (CPPS) (VDI/VDE 2013, BAUERNHANSL ET AL. 2016, HUMPERT ET AL. 2024). CPPS-basierte Fertigungseinrichtungen sind durch eine modulare Aufbauweise (Hardware) und inhärente Informations- und Kommunikationstechnik (Software) geprägt (VDI/VDE 2013, KOLBERG ET AL. 2017, HEINRICH ET AL. 2020). Basierend auf der damit einhergehenden Verknüpfung von realer („physischer“) und virtueller („cyber“) Welt entsteht ein Zusammenschluss intelligenter Produktionsobjekte (Ressourcen und Produkte), die über digitale Informationsnetzwerke (CPPS-Netzwerke) kommunizieren und weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen (VOGEL-HEUSER ET AL. 2015a, BAUERNHANSL 2017). Ein wesentliches Potenzial liegt in der Fertigung individualisierter Produkte zu den wirtschaftlichen Bedingungen einer Massenfertigung (VDI/VDE 2013, LICHTBLAU ET AL. 2015).

Zur Beherrschung der Fertigungskomplexität wird das Prinzip der starren Reihen- oder Fließfertigung teilweise aufgelöst, um unterschiedliche Takte sowie eine flexible Materialflussverkettung zu ermöglichen (BAUERNHANSL ET AL. 2016, STEHLE & HEISEL 2017, GRESCHKE 2020, KERN 2021). Als Schlüsselemente eines Fertigungssystems mit entkoppelten Fertigungszellen dienen die individuell zu fertigenden Produkte mit verknüpftem digitalem Produktgedächtnis (WAHLSTER 2013, BAUERNHANSL ET AL. 2016, GORECKY ET AL. 2017). Die intelligenten Produkte sind in der Lage, sich durch ihre Produktionsumgebung dezentral und selbstbestimmt zu steuern sowie mit den weiteren **intelligenten Produktionsobjekten** und den Menschen hinsichtlich ihrer Lebenszyklusdaten zu kommunizieren (WAHLSTER 2013, GORECKY ET AL. 2017). Dadurch können die produktspezifischen Produktionsparameter von den Produktionsobjekten individuell aufgenommen und verarbeitet werden (GORECKY ET AL. 2017). Dies ermöglicht eine Übertragung der Entscheidungsbefugnis von einer zentralen Steuerungseinheit auf intelligente Produktionsobjekte, um situationsspezifische Entscheidungen dezentral und prozessnah zu realisieren (VDI/VDE 2013, BAUERNHANSL ET AL. 2016, HUMPERT ET AL. 2024).

In das CPPS-Netzwerk eines Fertigungssystems mit entkoppelten Fertigungszellen sind, neben den für die freie Materialflussverkettung eingesetzten Produktionsobjekten, die Produktionsressourcen innerhalb der Fertigungszellen bedarfspezifisch integrierbar (VOGEL-HEUSER ET AL. 2015a, PANTFÖRDER ET AL. 2017, VOGEL-HEUSER 2017, KAUFMANN & FORSTNER 2017). **Fertigungszellen** als organisatorische Gruppe von Arbeitsstationen können dabei unterschiedliche Automatisierungsgrade aufweisen (WESTKÄMPEL 2006) und dank eines modular, rekonfi-

gürbaren Aufbaus verschiedene Konfigurationen über den Zeitverlauf annehmen (STEHLE & HEISEL 2017, HÖRAUF 2019). Zusätzlich zur Automatisierung physischer Prozesse (z. B. Bearbeitungs-, Handhabungsvorgänge) sind durch die CPPS-Einbindung intelligenter Betriebsmittel kognitive Tätigkeiten (z. B. Steuerungs-, Überwachungsaufgaben) automatisiert umsetzbar (BOGNER ET AL. 2017).

1.2 Problemstellung

Insgesamt wird in der Produktionsumgebung der zukünftig erreichbare Grad an Automatisierung und Anpassungsfähigkeit durch die im Sinne eines CPPS weitreichende Vernetzung und virtuelle Abbildung physischer Produktionsobjekte signifikant zunehmen (VDI/VDE 2013). Für die erfolgreiche Einführung des CPPS-Paradigmas sind Forschungsaktivitäten in diversen Fachdisziplinen, wie Automation, Informatik und Produktion, erforderlich (GEISBERGER ET AL. 2011, VDI/VDE 2013, HUMPERT ET AL. 2024). Unter anderem erfordert die Beherrschbarkeit von CPPS **neue methodische Ansätze** hinsichtlich deren Planung, Entwicklung und Betrieb (GEISBERGER ET AL. 2011, VDI/VDE 2013).

Im Bereich der Gestaltung von Produktionssystemen steht darüber hinaus die organisationszentrierte Ausrichtung im Fokus (DEUSE ET AL. 2014, GRONAU 2015). Technik- und humanzentrierte Faktoren gilt es demnach gezielt an die Prozesse und Strukturen der Organisation anzupassen (DEUSE ET AL. 2014). Es wird allerdings nur selten ein schlüsselfertiger Aufbau eines vollumfänglich vernetzten und digitalisierten Fertigungssystems erfolgen, sondern vielmehr eine **evolutionäre Realisierung** in Abhängigkeit von diversen Randbedingungen stattfinden (VDI/VDE 2013, HIRSCH-KREINSEN 2014, GRONAU 2015, HUMPERT ET AL. 2024). Fertigungszellen mit CPPS-basierten Automatisierungskonzepten werden folglich schrittweise als Insellösungen in den technisch-organisatorischen Strukturen eines Fertigungssystems verwirklicht, was langwierige und aufwendige Abstimmungsprozesse bedingen kann (HIRSCH-KREINSEN 2014).

Bei der initialen **Planung sukzessiv ausbaufähiger bzw. modularer, skalierbarer Fertigungszellen** in CPPS-Strukturen ist daher deren lebenszyklusorientierte Auslegung entsprechend veränderbarer Rahmenbedingungen und technologischer Entwicklungen von zentraler Bedeutung, um das richtige Maß an Anpassungsfähigkeit unter leistungs- und kostengerechten Gesichtspunkten zu finden (KOREN ET AL. 1999, WIENDAHL ET AL. 2007, HUMPERT ET AL. 2024). Die Kombination

von Ansätzen der Produktionssystementwicklung und der systemtechnischen Modellierung erlaubt hierbei eine zügige Reaktion auf sich abrupt ändernde Anforderungen (NEUHAUSEN 2001, EILERS 2015, HUMPERT ET AL. 2024).

Ein wesentlicher Stellhebel bei der Gestaltung modularer, skalierbarer Fertigungszellen stellt das **verfolgte Automatisierungskonzept** dar, da insbesondere der Automatisierungslevel einer Zelle entsprechend geänderter Rahmenbedingungen stufenweise angepasst werden kann (SLAMA 2004, BLUMENAU 2006, HIRSCH-KREINSEN 2014, STÄHR 2020, HUMPERT ET AL. 2024). Im CPPS-Kontext gilt es hierfür eine Vielfalt an Gestaltungsmöglichkeiten durch die Nutzung weitreichend vorhandener Daten, Informationen wie auch Dienste zu beachten (VDI/VDE 2013, HIRSCH-KREINSEN 2014), weshalb neben der Automatisierung physischer Prozesse insbesondere die Informationsautomatisierung im Fokus des nutzenorientierten Technologieeinsatzes steht (BOGNER ET AL. 2017, HUMPERT ET AL. 2024). CPPS-spezifische Faktoren sind daher bei der Produktionssystemplanung gesondert zu berücksichtigen und entsprechend systematisch mittels Modellen abzubilden (LASS ET AL. 2013, GRONAU 2015, HUMPERT ET AL. 2024). Um die Ansätze der Modellierung mit der CPPS-spezifischen und veränderungsfähigen Produktionssystementwicklung zu vereinigen, ist darüber hinaus eine modellgestützte Planungsvorgehensweise erforderlich (HUMPERT ET AL. 2024).

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass sich produzierende Unternehmen am Standort Deutschland in einem turbulenten Umfeld befinden und sich im Hinblick auf ihre Wettbewerbsfähigkeit schnell an veränderte Anforderungen durch hochflexible und wandlungsfähige Produktionssysteme anpassen müssen. Zur Befähigung veränderungsfähiger Strukturen in Hard- und Software werden im Zuge der Industrie 4.0-Initiative CPPS realisiert. Deren Umsetzung wird jedoch nicht vollumfänglich, sondern inkrementell und abhängig von den situativen Anforderungen erfolgen. Aufgrund vielfältiger Faktoren bei der lebenszyklusorientierten Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen bedarf es eines geeigneten **Planungsansatzes für Produktionssystemplaner**, damit diese in der Lage sind, fundierte Entscheidungen zu treffen.

1.3 Zielsetzung

Angesichts des stetig zunehmenden Veränderungsdrucks auf produzierende Unternehmen ist es das **übergeordnete Ziel** dieser Forschungsarbeit, einen Beitrag zur Erschließung von Veränderungs- und Produktivitätspotenzialen in der diskreten Serienfertigung individualisierter Produkte zu leisten. Im Mittelpunkt steht die

schrittweise Adaption eines Fertigungssystems mit CPPS-Strukturen, indem entkoppelte, modulare Fertigungszellen sukzessive an die Lebenszyklusanforderungen angepasst werden. Um die inkrementelle Anpassung insbesondere hinsichtlich des CPPS-basierten Automatisierungsgrades aus technisch-wirtschaftlicher Sicht zu fördern, soll der Produktionssystemplaner bei der initialen Grobplanung (vgl. z. B. VDI 5200, GRUNDIG 2018) von alternativen Aufbau- und Ausbaustufenkonzepten für modulare, skalierbare Fertigungszellen im CPPS-Kontext unterstützt werden. Im Nachfolgendem wird in dieser Arbeit vereinfacht lediglich von Ausbaustufenkonzepten geschrieben, obwohl damit auch der Aufbau gemeint ist.

Als **Zielsetzung** dieser Arbeit wird demnach die Entwicklung einer Planungsmethodik für modulare, skalierbare Fertigungszellen in CPPS-Strukturen eines veränderungsfähigen Fertigungssystems betrachtet. Der zu entwickelnde Ansatz soll die Initialplanung für den Aufbau und sukzessiven Ausbau von Fertigungszellen entsprechend den zukünftig zu erwartenden Anforderungen entlang des Lebenszyklus ermöglichen, um ein leistungs- und kostengerechtes Ausbaustufenkonzept zu erhalten (*Teilziel 3*). Dazu sind mithilfe eines Planungswerkzeugs alternative modulare, skalierbare Fertigungszellkonfigurationen für unterschiedliche Lebenszyklusphasen und unter besonderer Berücksichtigung des Automatisierungsgrades zu generieren (*Teilziel 2*). Für die Alternativengenerierung bedarf es der Abbildung charakteristischer Eigenschaften von modularen, skalierbaren Fertigungszellen in CPPS-Strukturen anhand generischer Modellierungs- und Beschreibungsansätze (*Teilziel 1*).

Zusammenfassend ergeben sich in Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit drei **Forschungsfragen**:

- Wie sind modulare, skalierbare Fertigungszellen hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Restriktionen in CPPS-Strukturen zu charakterisieren?
- Wie lassen sich im CPPS-Kontext modulare, skalierbare Zellkonfigurationen in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad generieren?
- Wie ist eine methodische Vorgehensweise zu gestalten, mit der sich Ausbaustufenkonzepte für modulare, skalierbare Fertigungszellen in CPPS-Strukturen initial planen lassen, um ein leistungs- und kostengerechtes Konzept für den Lebenszyklus zu erhalten?

1.4 Forschungsmethodischer Rahmen und Aufbau der Arbeit

Diese Forschungsarbeit kann entsprechend der **wissenschaftstheoretischen Einordnung** nach ULRICH & HILL (1976) den angewandten Handlungswissenschaften, die Teil der Realwissenschaften sind, zugeordnet werden. Diese Wissenschaftsdisziplin ist dadurch geprägt, dass das bisher vorhandene Handlungswissen zur Lösung einer praktischen Problemstellung nicht ausreicht (ULRICH & HILL 1976). Ausgehend von der vorliegenden Problemstellung (vgl. Abschnitt 1.2) wird daher mit dieser Forschungsarbeit eine Planungsmethodik für modulare, skalierbare Fertigungszellen im CPPS-Kontext erarbeitet.

Der sich ergebende theoretische Erkenntnisgewinn entsteht aus der Wechselwirkung zwischen Vorerfahrungen und neu gewonnenen Erkenntnissen in Anlehnung an das **heuristische Forschungsdesign** nach KUBICEK (1977), das im Forschungsablauf durch einen iterativen Lernprozess charakterisiert ist und die Vorerfahrungen in einem heuristischen Bezugsrahmen dargelegt (vgl. KUBICEK 1977). Den heuristischen Bezugsrahmen (Abbildung 1) in dieser Forschungsarbeit bildet ein Verbund aus den Themenbereichen Produktdesign, Fertigungssystemdesign, CPPS-basierte Fertigungsautomatisierung und Veränderungsmanagement.

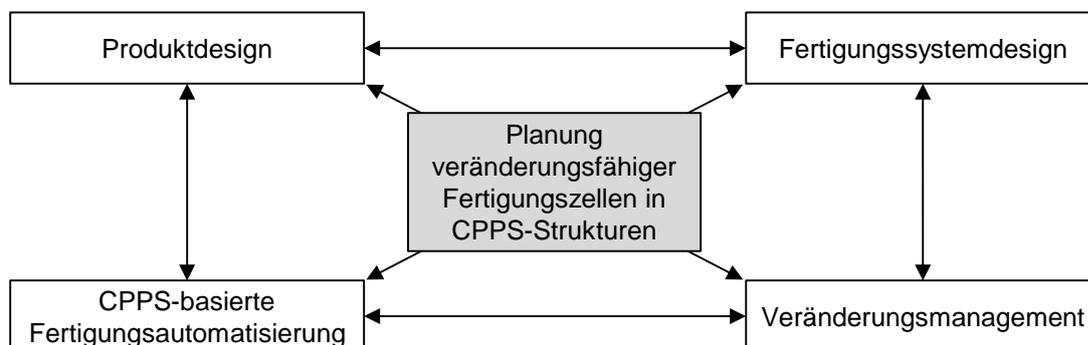


Abbildung 1: *Heuristischer Bezugsrahmen der Forschungsarbeit*

Weiterhin orientiert sich die Forschungsarbeit an einem strukturgebenden Forschungsansatz, um damit den wissenschaftlichen Anforderungen gerecht zu werden. Dem **Aufbau der Arbeit** (Abbildung 2) liegt dazu die forschungsmethodische Vorgehensweise in Anlehnung an den dritten Typ der Forschungsdesignmethodik, in Englisch Design Research Methodology (DRM), nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009) zugrunde.

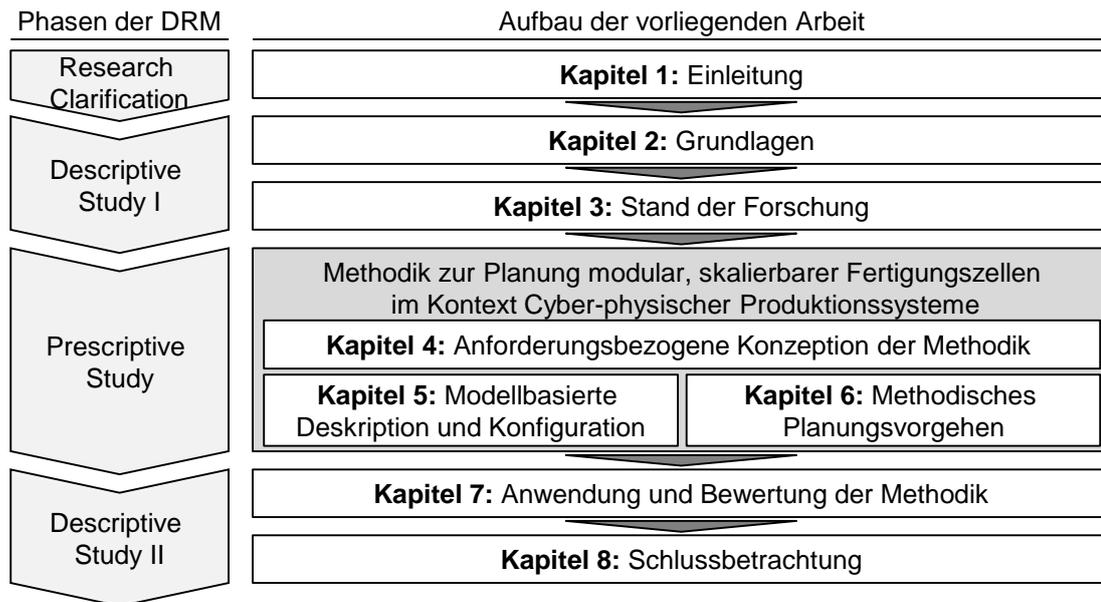


Abbildung 2: Aufbau der Forschungsarbeit aufbauend auf BLESSING & CHAKRABARTI (2009)

In der ersten Phase des DRM erfolgt zur Klärung der Forschung, in Englisch **Research Clarification**, die reviewbasierte Erarbeitung der Forschungsziele anhand der Literaturanalyse. Im einleitenden *ersten Kapitel* sind hierzu die Ausgangssituation, Problemstellung, Zielsetzung sowie der forschungsmethodische Rahmen und Aufbau der Arbeit dargelegt.

Darauf basierend werden zur Erreichung der Forschungsziele in der zweiten Phase namens Deskriptive Studie I, in Englisch **Descriptive Study I**, die Defizite des Forschungsstandes identifiziert, wobei dies ebenfalls reviewbasiert und mithilfe der Literaturrecherche stattfindet. Zum Verständnis der Forschungsarbeit behandelt das *zweite Kapitel* demnach die relevanten Grundlagen zum veränderungsfähigen Produktionssystem, zum Cyber-physischen Produktionssystem und zur Planung modularer, skalierbarer Produktionssysteme. Anschließend wird im *dritten Kapitel* zunächst auf Vorarbeiten zum Stand der Forschung hinsichtlich der Planung veränderungsfähiger und CPPS-spezifischer Produktionssysteme sowie deren Modellierung eingegangen, bevor der Handlungsbedarf abgeleitet wird.

Aufbauend auf den reviewbasiert gewonnenen Erkenntnissen erfolgt in der dritten Phase der Präskriptiven Studie, in Englisch **Prescriptive Study**, die umfassende Behandlung der relevanten Themenfelder mit dem Ziel, die identifizierten Defizite durch die kreativ-synthetische Entwicklung eines neuartigen Ansatzes zu beheben. Dazu findet im *vierten Kapitel* die anforderungsgerechte Gesamtkonzeption der Planungsmethodik für modulare, skalierbare Fertigungszellen in CPPS-Strukturen

statt. Die Methodik besteht sowohl aus dem im *fünften Kapitel* dargelegten modellgestützten Ansatz zur generischen Deskription und Konfigurationsgenerierung von Fertigungszellen als auch aus dem im *sechsten Kapitel* ausgeführten methodischen Vorgehen für die Planung von Ausbaustufenkonzepten.

Im abschließenden vierten Schritt mit der Bezeichnung Deskriptive Studie II, in Englisch **Descriptive Study II**, erfolgt durch initiale Anwendung des entwickelten Ansatzes die empirische Überprüfung hinsichtlich prinzipieller Funktionsfähigkeit und Nutzen. Dementsprechend wird die entwickelte Planungsmethodik im *siebten Kapitel* anhand eines praktischen Anwendungsfalles evaluiert, technisch-wirtschaftlich bewertet und kritisch reflektiert. Die Schlussbetrachtung mit einer einordnenden Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse und einem Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf rundet die Arbeit im finalen *achten Kapitel* ab.

2 Grundlagen

2.1 Veränderungsfähige Produktionssysteme

Um ein einheitliches Verständnis in dieser Arbeit zu schaffen, wird zunächst auf die grundlegenden Begrifflichkeiten eines veränderungsfähigen Produktionssystems eingegangen, bevor die relevanten Grundlagen zum Cyber-physischen Produktionssystem (Abschnitt 2.2) und zur Planung von Produktionssystemen (Abschnitt 2.3) behandelt werden. In diesem Abschnitt werden dazu die wesentlichen Grundzüge von Produktionssystemen (Abschnitt 2.1.1), ein Überblick über die Veränderungsfähigkeit im Produktionssystem (Abschnitt 2.1.2) und die Veränderungstypen Wandlungsfähigkeit und Flexibilität (Abschnitt 2.1.3) sowie Rekonfigurierbarkeit und Umrüstbarkeit (Abschnitt 2.1.4) beleuchtet.

2.1.1 Grundzüge von Produktionssystemen

Die Charakteristika von Produktionssystemen ergeben sich aus der Systemtheorie (WESTKÄMPER 2006, WESTKÄMPER & ZAHN 2009, SCHENK ET AL. 2014). Demgemäß beinhaltet ein System eine abgegrenzte Menge von jeweils eigenschaftsspezifischen Elementen, die sich gegenseitig über Relationen zur Verfolgung definierter Ziele verbinden (PATZAK 1982, ROPOHL 2009, SCHENK ET AL. 2014). Dabei führt die Kombination der Elemente zu mehr als nur der Summe jeder einzelnen Elementeigenschaft (PATZAK 1982, ROPOHL 2009, CLAUSSEN 2012). Besitzt ein System darüber hinaus Beziehungen zu seiner Umgebung, kann es als Teilsystem eines Gesamtsystems betrachtet werden (PATZAK 1982, ROPOHL 2009).

In diesem Zusammenhang wird unter dem Begriff **Produktionssystem** (Abbildung 3) ein soziotechnisches System zur Erstellung materieller Güter verstanden, das in einem Wertschöpfungsprozess (z. B. Fertigungsprozess) mit assoziierten Prozessen (z. B. Lagerung, Transport) Input- (z. B. Material, Arbeitsleistung, Energie) in Outputfaktoren (z. B. Produkte, Kosten, Reststoffe) transformiert (DANGELMAIER 2001, WESTKÄMPER 2006, HEINEN ET AL. 2008, SPUR 2012, SCHENK ET AL. 2014). Ein Produktionssystem stellt demnach eine abgeschlossene Leistungseinheit dar, die übergeordneten Zielen folgt und mit zusammengefassten Produktionsprozessen die Wertschöpfung von Erzeugnissen in einem Unternehmen ermöglicht (WESTKÄMPER 2003). Die entsprechende Abfolge der Transformationen wird dazu mittels der Aufbau- und Ablauforganisation festgelegt (WESTKÄMPER 2006, HEINEN ET AL. 2008, SCHENK ET AL. 2014).

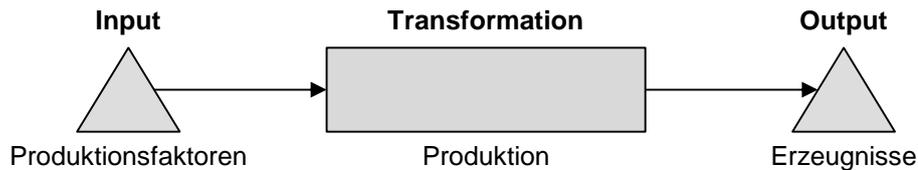


Abbildung 3: Produktionssysteme als Transformationsprozess in Anlehnung an DANGELMAIER (2001) und SCHENK ET AL. (2014)

Mit der Ablauforganisation wird aus Prozesssicht das Zusammenwirken von Ressourcen und Inputfaktoren zur Erzielung der Produktherstellung einer Leistungseinheit geregelt (WESTKÄMPER 2006, SCHENK ET AL. 2014). Die Begriffe Produkt, Prozess und Ressource sind wie folgt definiert:

- Der Begriff **Produkt** beschreibt ein Objekt, das als Arbeitsgegenstand durch die Ausführung von Prozessen mittels Ressourcen hergestellt werden soll (BACKHAUS & REINHART 2017, STANEV 2018). In dieser Arbeit wird sich auf individualisierte Bauteile bzw. Einzelteile eines Werkstückspektrums bezogen, die anhand bestimmter Eigenschaften in Teilefamilien gruppiert sind (GRÄBLER 2004, LINDEMANN & MAURER 2006).
- Unter den Begriff **Prozess** werden technische (z. B. Fräsen) und organisatorische (z. B. Planen) Vorgänge zur Herstellung von Produkten verstanden, die durch Ressourcen ausgeführt werden (WESTKÄMPER 2006). Dabei kann zwischen wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Vorgängen differenziert werden (WESTKÄMPER 2006). Ebenso kann ein Prozess aus mehreren Teilprozessen bestehen (WESTKÄMPER 2006, STANEV 2018).
- Die zur Ausführung eines Prozesses erforderlichen Mittel sind durch den Begriff **Ressource** definiert (HEINEN ET AL. 2008, STANEV 2018). Hierzu gehören, neben den Menschen mit dessen Kompetenzen und Fähigkeiten, auch Material, Energie, Information und Wissen sowie technische Ressourcen, wie Gebäude und Flächen, IT-Systeme oder Betriebs- und Betriebsmittel (WESTKÄMPER 2006, HEINEN ET AL. 2008). Ferner sind die Betriebsmittel gemäß VDI 2815 nach dem auszuführenden Produktionsprozess in z. B. Fertigungs-, Förder- oder Organisationsmittel gegliedert.

In enger Abstimmung mit der Prozessbildung (Ablauforganisation) einer Leistungseinheit, die wiederum aus Leistungseinheiten bestehen kann (WESTKÄMPER 2003), steht deren technisch-organisatorische Strukturierung im Rahmen der Aufbauorganisation (WESTKÄMPER 2006, SCHENK ET AL. 2014). Bei einem produzierenden Unternehmen steht gemäß dem Ebenen-Modell (Abbildung 4) aus

Ressourcensicht das Produktionsnetzwerk auf oberster Hierarchieebene, das sich in Fabriken, Segmente, Systeme, Zellen und Stationen untergliedert, wobei lediglich die drei letztgenannten im Betrachtungsbereich dieser Arbeit liegen.

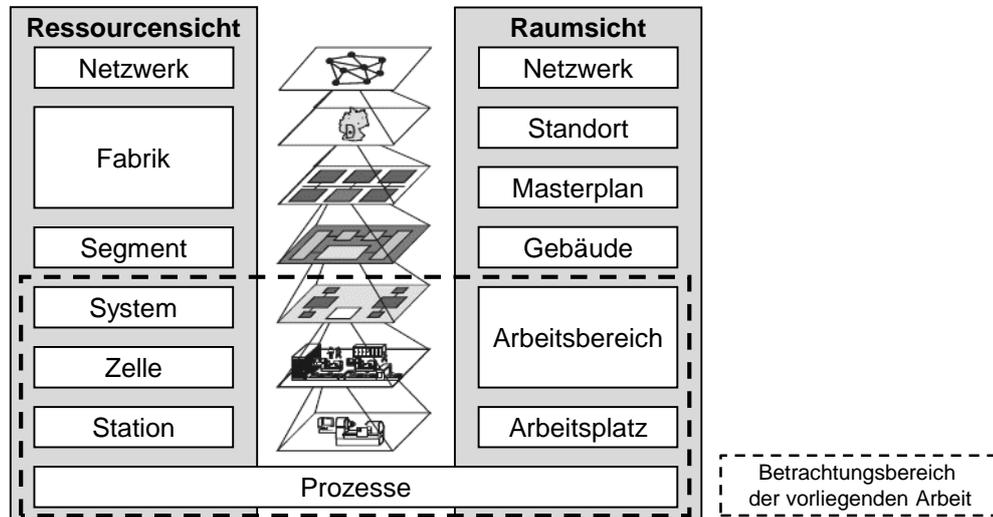


Abbildung 4: Hierarchieebenen von Produktionssystemen in Anlehnung an WESTKÄMPER (2006), WIENDAHL ET AL. (2007), WESTKÄMPER & ZAHN (2009) und WIENDAHL ET AL. (2014)

Die Begriffsdefinitionen Fertigungssystem, Fertigungszelle und Arbeitsstation basieren im Wesentlichen auf den Arbeiten von WESTKÄMPER (2006) und WIENDAHL ET AL. (2007, 2014). Das **Fertigungssystem** ist in übergeordnete Segmente eingebunden. Es umfasst mehrere Fertigungszellen, die mittels Lager- und Transporteinrichtungen verkettet und sowohl in einem Ver- und Entsorgungssystem für Materialien und Medien als auch einem Informations- und Kommunikationssystem eingebettet sind. Die **Fertigungszelle** stellt dabei eine organisatorisch abgegrenzte Einheit dar, um damit eine Folge von Operationen für die Herstellung von Werkstücken auszuführen oder eine bessere Arbeitsteilung (z. B. Mehrmaschinenbedienung) zu ermöglichen. Diese vereint dazu Arbeitsstationen mit der zugehörigen Peripherie zur Informationsversorgung, einer gemeinsamen Medien- und Materialflussanbindung sowie entsprechender Werkzeuge und Vorrichtungen. Eine **Arbeitsstation** repräsentiert hierbei die Verrichtungsstelle zur Ausführung von manuellen oder maschinellen Tätigkeiten, um mittels bestimmter Fertigungsverfahren die Werkstückherstellung zu realisieren. Mit **Stationsmodulen** wird in diesem Zusammenhang die innere, modulare Struktur von Arbeitsstationen repräsentiert.

Darüber hinaus kann die Produktion aus organisatorischer Sicht verschiedenartig strukturiert sein. Grundsätzlich erfolgt in Anlehnung an WESTKÄMPER (2006) und

WIENDAHL & WIENDAHL (2020) eine **Strukturierung** (Abbildung 5) anhand der Gegenüberstellung von Fertigungsarten und -prinzipien. Während Fertigungsprinzipien die räumliche und materialflussorientierte Struktur kennzeichnen, definieren Fertigungsarten die produktbezogene Fertigungsspezialisierung. Im Fokus dieser Arbeit steht hinsichtlich der Individualisierung von Teilefamilien die Einzel- und Kleinserienfertigung (vgl. Abschnitt 1.3), die durch das Werkstätten- und Gruppentechnologieprinzip (Fertigungszelle, Flexible Fertigungssysteme) abgedeckt sind. Bezüglich detaillierter Ausführungen wird auf die Fachliteratur (vgl. z. B. WIENDAHL & WIENDAHL 2020) verwiesen.

Fertigungsarten \ Fertigungsprinzipien		Einplatzprinzip	Verrichtungsprinzip		Fließ- oder Erzeugnisprinzip		
		Baustellenfertigung	Werkstättenprinzip	Fertigungszellen / -inseln	Flexible Fertigungssysteme	Fließprinzip ohne Takt	Fließprinzip getaktet
Einzel- fertigung	Einmal- fertigung	●	●				
	Wiederhol- fertigung	●	●	●			
Mehrfach- fertigung	Varianten- fertigung		●	●	●		
	Serien- fertigung				●	●	●
	Massen- fertigung					●	●

Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung

Abbildung 5: Strukturierung anhand von Fertigungsart und -prinzip in Anlehnung an WESTKÄMPER (2006) und WIENDAHL & WIENDAHL (2020)

2.1.2 Veränderungsfähigkeit im Produktionssystem

Auf ein Produktionssystem wirken in einem turbulenten Unternehmensumfeld äußere Turbulenzen aus verschiedenen Einflussbereichen, wie Gesellschaft (z. B. Individualisierung), Politik (z. B. geänderte Umweltgesetze), Technologie (z. B. neue Informationstechnologien) oder Wettbewerb (z. B. neue Konkurrenzprodukte) (vgl. z. B. KLEMKE ET AL. 2012, KLEMKE 2014). Diese sogenannten **Veränderungstreiber** können einen Veränderungsdruck auf die verschiedenen Produktionsebenen (vgl. Abschnitt 2.1.1) bewirken. Da die einzelnen Veränderungstreiber schwer zu charakterisieren sind, aber sich teilweise hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Produktion überlagern, eignet sich demnach die Analogie zu Rezeptoren (CISEK ET AL. 2002).

Die Rezeptoren fungieren dabei gemäß einem Rezeptormodell (Abbildung 6) als Sinnesorgane des Produktionssystems, um die Auswirkungen von Veränderungstreibern auf das Produktionssystem systematisch mit einer begrenzten Rezeptoranzahl zu erfassen (CISEK ET AL. 2002, MÖLLER 2008, HEINEN ET AL. 2008). Basierend auf MÖLLER (2008) sind sechs **Rezeptoren bzw. Veränderungsdimensionen** definiert: Produkt, Stückzahl, Zeit, Kosten, Qualität und Technologie. Während sich der Rezeptor *Produkt* bzw. -varianten auf produktseitige Produktionsanforderungen in Form von Eigenschaften und Funktionen bezüglich des zu erbringenden Outputs des Produktionssystems bezieht, definiert die *Stückzahl* die zu produzierenden Mengen an Produkten bzw. -varianten. Dagegen werden mit dem Rezeptor *Zeit* die zu erfüllenden Zeitpunkte zur Befriedigung von Kundenbedarfen determiniert und mittels der *Qualität* die kundenspezifischen Qualitätsanforderungen übermittelt. Weiterhin werden sämtliche Preisänderungen von Produktionsfaktoren über die *Kosten* festgehalten sowie Änderungen an bereitstehenden bzw. zukünftigen Produktionsmitteln anhand des Rezeptors *Technologie* berücksichtigt.

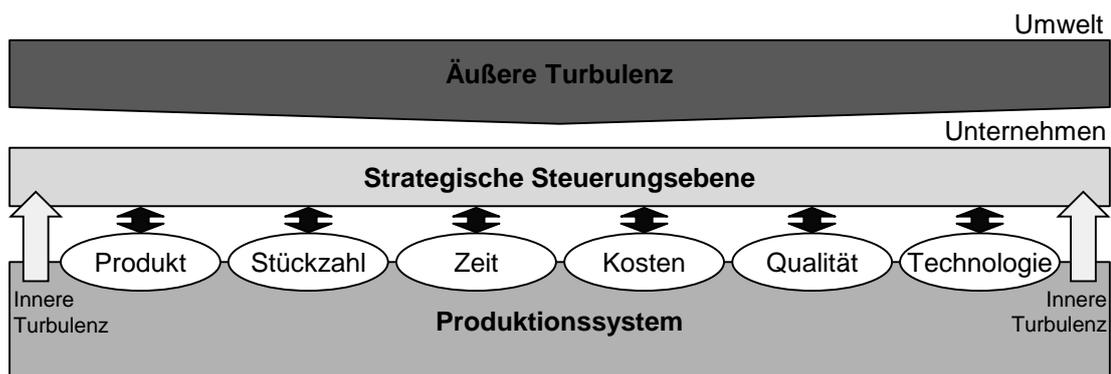


Abbildung 6: Rezeptormodell in Anlehnung an CISEK ET AL. (2002), HEINEN ET AL. (2008) und MÖLLER (2008)

Die aus den Rezeptoren bzw. Veränderungsdimensionen entstehenden Turbulenzen können eine Adaption des Produktionssystems über die Veränderungsfähigkeit bewirken. Mit der **Veränderungsfähigkeit** wird die Fähigkeit verstanden, durch deren proaktive Implementierung, zukunftsrobuste Anpassungen auf allen Ebenen eines Produktionssystems (vgl. Abschnitt 2.1.1) zu ermöglichen (WIENDAHL ET AL. 2007, WESTKÄMPER & ZAHN 2009, WIENDAHL ET AL. 2014, GRUNDIG 2018).

Nach ELMARAGHY & WIENDAHL (2009) und WIENDAHL ET AL. (2014) umfasst die Veränderungsfähigkeit als Oberbegriff fünf **Veränderungsklassen** bzw. -ty-

pen. Die Agilität repräsentiert dabei den strategischen Veränderungstyp und bezieht sich auf die Netzwerkebene (vgl. Abschnitt 2.1.1), um das gesamte Unternehmen vornehmlich proaktiv entsprechend den Marktanforderungen auszurichten (WIENDAHL 2002, WIENDAHL ET AL. 2014). Von zentraler Relevanz für diese Arbeit sind jedoch die Ebenen System, Zelle und Station, weshalb die taktischen und operativen Veränderungstypen Wandlungsfähigkeit und Flexibilität (Abschnitt 2.1.3) sowie Rekonfigurierbarkeit und Umrüstbarkeit (Abschnitt 2.1.4) nachfolgend erläutert sind.

2.1.3 Wandlungsfähigkeit und Flexibilität

Die **Wandlungsfähigkeit** stellt die taktische Veränderungsfähigkeit einer ganzen Fabrik dar und setzt die Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Umrüstbarkeit auf den darunterliegenden Produktionsebenen (vgl. Abschnitt 2.1.1) voraus (WIENDAHL ET AL. 2014). In der Literatur existieren unterschiedliche Definitionen für die Wandlungsfähigkeit (vgl. z. B. REINHART 2000, WESTKÄMPER ET AL. 2000, WIENDAHL 2002, ZÄH ET AL. 2005, REINHART ET AL. 2008). Im Wesentlichen stellt die Wandlungsfähigkeit einen vorgedachten Freiraum als Eigenschaft eines Produktionssystems dar, mit dem auf einen erkannten Veränderungsbedarf reagiert werden kann (HERNÁNDEZ MORALES 2003, SUDHOFF 2008, HEINEN ET AL. 2008).

Zur Veranschaulichung dient die **Gegenüberstellung der Wandlungsfähigkeit und Flexibilität** (Abbildung 7). Die Flexibilität wird dabei als operative Fähigkeit verstanden, mit der sich ein Produktionssystem ohne große Modifikationen innerhalb eines definierten Flexibilitätskorridors zügig und zu geringen Kosten umstellen kann (ZÄH ET AL. 2005, ABELE ET AL. 2006). Demgegenüber ist die Wandlungsfähigkeit als taktische Fähigkeit definiert, das eine Anpassung auch jenseits vorgehaltener Flexibilitätskorridore durch strukturelle Eingriffe bei geringen Investitionsaufwand ermöglicht (REINHART ET AL. 2008). Demnach lässt sich innerhalb eines Wandlungskorridors der für einen auftretenden Veränderungstreiber einer Veränderungsdimension nicht ausreichende Flexibilitätskorridor nach unten bzw. oben verschieben.

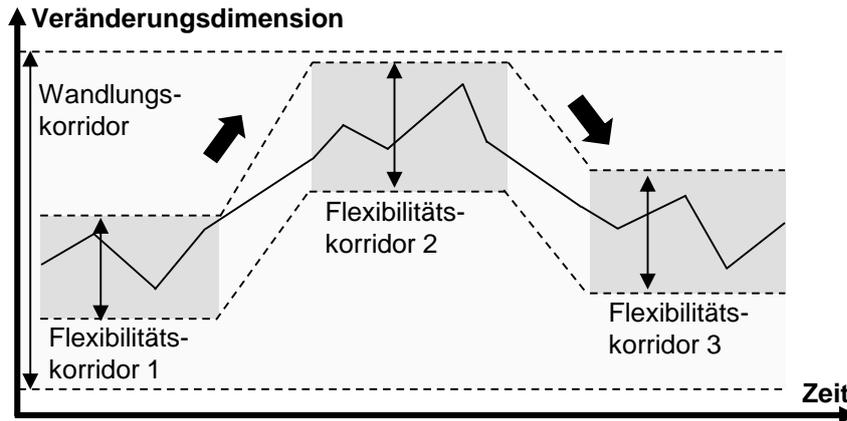


Abbildung 7: Gegenüberstellung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an ZÄH ET AL. (2005) und WIENDAHL ET AL. (2014)

Der Wandlungskorridor bzw. die Umsetzung der Wandlungsfähigkeit wird durch die Implementierung sogenannter **Veränderungs- bzw. Wandlungsbefähiger** in die Organisation, technischen Einrichtungen und räumlichen Anordnungen der Hierarchieebenen (vgl. Abschnitt 2.1.1) zugehörigen Fabrikobjekte und unter Berücksichtigung der zeitlichen Dimension ermöglicht (vgl. HERNÁNDEZ MORALES 2003, WIENDAHL ET AL. 2014). In der Literatur existieren zahlreiche Veränderungs- bzw. Wandlungsbefähiger (vgl. z. B. WIENDAHL ET AL. 2007, SCHOLZREITER & SOWADE 2010). Als die primären Befähiger gelten die Modularität, Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit und Kompatibilität, denen sekundäre Befähiger (z. B. Neutralität) für deren Ergänzung und Spezifizierung untergeordnet sind (HEINEN ET AL. 2008). Die fünf primären Veränderungsbefähiger sind nach NYHUIS ET AL. (2007) und WIENDAHL ET AL. (2014) wie folgt definiert:

- *Universalität*: Dimensionierung und Gestaltung für verschiedene Anforderungen hinsichtlich Produkt oder Technologie, z. B. Variantenflexibilität
- *Mobilität*: Örtlich weitgehend uneingeschränkte Beweglichkeit von Objekten, z. B. Maschinen auf Rollen
- *Skalierbarkeit*: Technische, räumliche und personelle Atmungsfähigkeit (Erweiter- und Reduzierbarkeit), z. B. flexibles Arbeitszeitmodell zur Anpassung der verfügbaren Kapazität
- *Modularität*: Standardisierte, funktionsfähige Einheiten oder Elemente, z. B. modular aufgebauter Arm eines Industrieroboters
- *Kompatibilität*: Vernetzungsfähigkeit bezüglich Material, Information, Medien und Energie, z. B. einheitliche Softwareschnittstellen zur Verknüpfung von Steuerungen

Der Bedarf an Wandlungsfähigkeit hängt, wie in der Gegenüberstellung (vgl. Abbildung 7) ersichtlich, erheblich von der **Flexibilität** ab. Ist die vorgehaltene Flexibilität im Produktionssystem stark ausgeprägt, sind weniger wandlungsfähige Lösungen erforderlich (HEINEN ET AL. 2008). Als geeignete Kombination dient daher die Begrenzung des kostenintensiven, vorab installierten Flexibilitätskorridors bei einer gleichzeitig möglichst schnellen Wandelreaktion (SPATH 2017). Zur Konkretisierung von Flexibilitätsarten (z. B. Bearbeitungs-, Prozessflexibilität) eines Flexibilitätskorridors sei auf die einschlägige Literatur (vgl. z. B. BROWNE ET AL. 1984, SETHI & SETHI 1990, KOSTE & MALHOTRA 1999) verwiesen.

2.1.4 Rekonfigurierbarkeit und Umrüstbarkeit

In engem Zusammenhang mit der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit stehen die Rekonfigurierbarkeit und Umrüstbarkeit (NYHUIS ET AL. 2008, HEINEN ET AL. 2008). Eine eindeutige Abgrenzung der Begrifflichkeiten Rekonfigurierbarkeit und Umrüstbarkeit ist allerdings nicht möglich, wie die exemplarische Gegenüberstellung an einer Werkzeugmaschine (Abbildung 8) in Anlehnung an LORENZER (2011) und HEES (2017) verdeutlicht. Abhängig von der Eingriffstiefe für Anpassungen treten dabei Überschneidungen hinsichtlich Umrüstung, Rekonfiguration und Herstellung bzw. Inbetriebnahme auf, wobei die Anpassungsaufwände für letztere die Aufwände für die anderen beiden erheblich übersteigen.

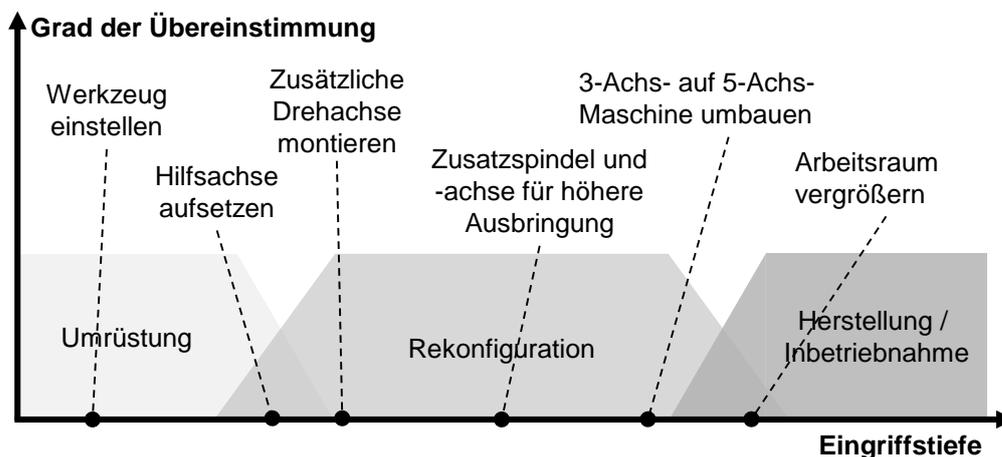


Abbildung 8: Exemplarische Gegenüberstellung von Umrüstbarkeit, Rekonfigurierbarkeit und Herstellung an einer Werkzeugmaschine in Anlehnung an LORENZER (2011) und HEES (2017)

Die **Umrüstbarkeit** beschreibt die operative Fähigkeit einer Anlage bzw. eines Produktionssystems, sich zu jeder Zeit zügig und aufwandsarm durch den Wechsel

eines festgelegten Arbeitszustandes in einen anderen Zustand an unterschiedliche Arbeitsaufgaben manuell oder automatisch anzupassen (HEINEN ET AL. 2008, ELMARAGHY & WIENDAHL 2009, WIENDAHL ET AL. 2014). Die Struktur einer Anlage bzw. Station wird dabei nicht wesentlich verändert. Als Beispiel ist das Einrichten von Werkzeugen zu nennen (vgl. Abbildung 8).

Demgegenüber bezeichnet die **Rekonfigurierbarkeit** die taktische Fähigkeit zur schnellen Anpassung einer Anlage oder eines Produktionssystems an geänderte Anforderungen durch das Hinzufügen, Entfernen, Austauschen oder Modifizieren einzelner Funktionselemente in der Struktur wie auch der Hard- und Softwarekomponenten (KOREN ET AL. 1999, ELMARAGHY & WIENDAHL 2009, WIENDAHL ET AL. 2014). ELMARAGHY (2006) differenziert in diesem Zusammenhang zwischen harten und weichen Rekonfigurationen. Unter eine harte Rekonfiguration fallen physische Anpassungen (z. B. Hinzufügen bzw. Entfernen von Betriebsmitteln), während eine weiche Rekonfiguration für logische Anpassungen in der Organisation (z. B. Zusatzschichten) oder an der Software steht (ELMARAGHY 2006).

Beispielhaft lässt sich aus einer bestehenden Anlagenkonfiguration eine neue Konfiguration mit erweitertem mechanischen Freiheitsgrad realisieren, indem deren austauschbares Modul für die 3-Achs-Bearbeitung durch eines für die 5-Achs-Bearbeitung ersetzt wird (vgl. Abbildung 8). Unter dem Begriff Konfiguration wird dabei, entsprechend vorgegebener Anforderungen, die erstmalige Zusammensetzung einer solchen Anlage aus einzelnen „Plug & Produce“-fähigen Modulen verstanden. Das „Plug & Produce“-Prinzip leitet sich aus der „Plug & Play“-Philosophie der Informationstechnik ab und beschreibt, dass sich einzelne Module ohne größeren Aufwand miteinander kombinieren oder verändern lassen (HILDEBRAND 2005, DÜRKOP & JASPERNEITE 2017).

2.1.5 Modularisierung von Produktionssystemen

Die **Modularität** stellt wegen deren strukturbildenden Eigenschaft den zentralen Veränderungs befähiger dar und fördert zugleich die weiteren Veränderungs befähigern (vgl. Abschnitt 2.1.3) (KLUßMANN ET AL. 2005, DRABOW 2006). Im Wesentlichen führt die Modularität zur Entkopplung der Elemente eines Produktionssystems und einer systematisch gegliederten Struktur, die aus organisatorischen Einheiten (Modulen) von handhabbarer Größe bestehen (KLUßMANN ET AL. 2005). Ein Modul ist dadurch gekennzeichnet, dass es eine abgegrenzte Funktionalität, definierte Schnittstellen und eine möglichst hohe Unabhängigkeit von anderen, kombinierbaren Modulen aufweist (GÖPFERT 1998).

Die Modularisierung wird ebenso auf individualisierte Produkte durch die Bildung funktionaler und logischer Einheiten angewendet, wobei eine unveränderliche Grundstruktur den strukturellen und gestalterischen Rahmen vorgibt und verschiedene Individualisierungsoptionen die individuelle Gestaltung ermöglichen (LINDEMANN & MAURER 2006). Um die Komplexität bei der **Serienfertigung individualisierter Produkte** zu minimieren, gilt es über den modulbasierten Zusammenhang zwischen Produkten und Prozessen des Produktionssystems die gegenseitigen Abhängigkeiten abzustimmen (NEUHAUSEN 2001, EILERS 2015).

Zur Umsetzung der wirtschaftlichen Serienfertigung individualisierter Produkte wird daher die teilweise Auflösung des Taktprinzips vollzogen und ein **modulares Fertigungssystem mit entkoppelten Fertigungszellen** (Abbildung 9) bedarfspezifisch ausgelegt (GRESCHKE 2020, KERN 2021). Die weitgehend eigenständigen Fertigungszellen werden dazu über ein Transportsystem flexibel verknüpft und auftragsspezifisch vom Produkt angesteuert. Jede Fertigungszelle, bestehend aus einer oder mehrerer Arbeitsstationen, fokussiert sich dabei auf die Ausführung spezifischer Prozessfolgen oder die Zusammenstellung gleichartiger Fertigungstechnologien und Tätigkeitsspektren. Basierend auf der modularen und entkoppelten Systemstruktur lassen sich somit die Fertigungszellen und der Materialfluss adaptiv an Veränderungstreiber anpassen. Zentrale Basis für die technische Implementierung dieses Organisationskonzepts stellt die dezentral verteilte Produktionssteuerung im Kontext eines Cyber-physischen Produktionssystems (vgl. Abschnitt 2.2) dar (BAUERNHANS ET AL. 2016, GRESCHKE 2020, KERN 2021).

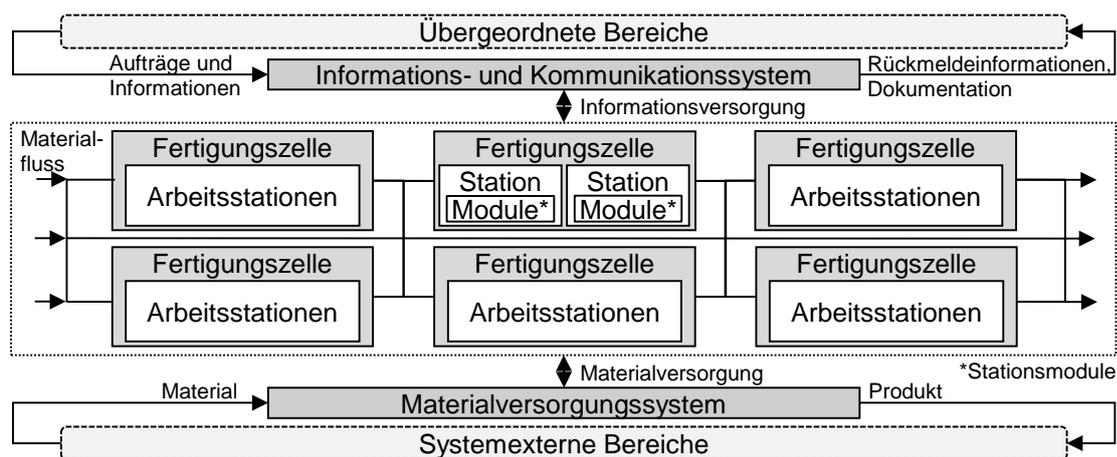


Abbildung 9: *Generisches Modell eines modularen Fertigungssystems mit entkoppelten Fertigungszellen aufbauend auf WESTKÄMPER (2006), KLUGE (2011), GRESCHKE (2020) und KERN (2021)*

2.2 Cyber-physische Produktionssysteme (CPPS)

In diesem Abschnitt werden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen zum Cyber-physischen Produktionssystem (CPPS) beleuchtet. Ausgehend vom Allgemeinen zur CPPS-basierten Fertigungsautomatisierung (Abschnitt 2.2.1) erfolgt die überblicksmäßige Darlegung eines Fertigungssystems mit CPPS-Strukturen (Abschnitt 2.2.2). Daran anknüpfend werden Bestandteile eines CPPS anhand der Steuerungs- und Kommunikationsstruktur (Abschnitt 2.2.3) und intelligenter Objekte (Abschnitt 2.2.4) näher erläutert, bevor auf die Charakteristika rekonfigurierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen (Abschnitt 2.2.5) eingegangen wird.

2.2.1 Allgemeines zur CPPS-basierten Fertigungsautomatisierung

Gegenstand dieser Forschungsarbeit stellt eine Methodik zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen dar, bei der die schrittweise Anpassung des Automatisierungsgrades von zentraler Bedeutung ist (vgl. Abschnitt 1.3). Den Ausgangspunkt der Automatisierung stellt die Mechanisierung dar, unter der „(...) die Substitution von menschlicher durch mechanische Leistung mittels technischer Hilfsmittel“ (CIRP 2020) verstanden wird. Findet über die Mechanisierung hinaus eine Übertragung kognitiver und entscheidungsbefähigender Funktionen, wie Prozesssteuerungs- und -regelungsaufgaben, vom Menschen auf technische Hilfsmittel statt, so wird von **Automatisierung** gesprochen (NOF 2009, CIRP 2020). Die Automatisierung beschreibt somit die reproduzierbare und eigenständige Prozessausführung durch eine technische Anlage abhängig von der Notwendigkeit menschlichen Eingriffs (WESTKÄMPER 2006, FROHM ET AL. 2008).

Im engen Zusammenhang mit der Automatisierung stehen der Automatisierungsgrad und die Automatisierungsstufe. Der **Automatisierungsgrad** ist definiert als der Anteil automatisierter Funktionen an den Gesamtfunktionen eines Systems (NOF 2009, CIRP 2020). Demzufolge nimmt der Automatisierungsgrad Werte zwischen 0 und 1 an, wobei selbst die höchst automatisiertesten Systeme den Maximalwert nicht erreichen, da diese menschliche Überwachung, Entscheidungsfindung und Kontrolle erfordern (FROHM 2008). Zur Bestimmung eines Automatisierungsgrades eignen sich relative Vergleichsansätze, wie eine abgestufte Skala mit mehreren Automatisierungsstufen (NOF 2009). Unter dem Begriff **Automatisierungsstufe bzw. -level** wird die Teilmenge automatisierter Vorgänge an der Gesamtmenge aller Vorgänge verstanden (WESTKÄMPER 1977, NOF 2009).

Im Grunde erfordern verschiedenartige technisch-wirtschaftliche Bedingungen **Fertigungskonzepte** mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden. Fertigungskonzepte (Abbildung 10) lassen sich dazu, wie nachfolgend beschrieben, abhängig von der Produktivität und Flexibilität einordnen. Bezüglich detaillierten Erläuterungen zu den einzelnen Fertigungskonzepten sei an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur (vgl. z. B. WESTKÄMPER 2006, WIENDAHL & WIENDAHL 2020, HEINRICH ET AL. 2020) verwiesen.

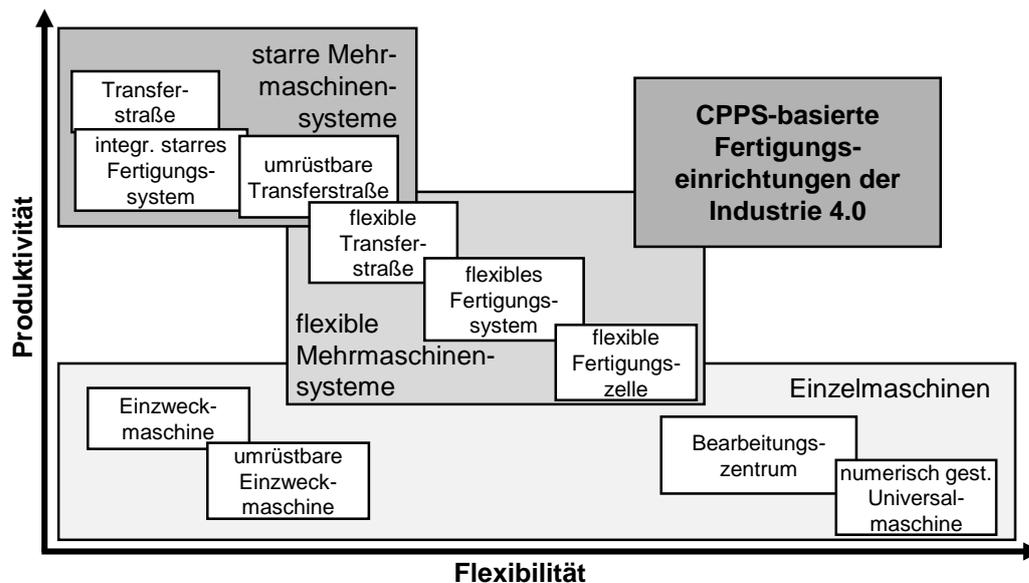


Abbildung 10: Einteilung von Fertigungskonzepten abhängig von Produktivität und Flexibilität in Anlehnung an STEHLE & HEISEL (2017) und HEINRICH ET AL. (2020)

Während Einzelmaschinen und starre Mehrmaschinensysteme nicht in der Lage sind, den Zielkonflikt zwischen Produktivität und Flexibilität zu lösen, müssen bei flexiblen Mehrmaschinensystemen Kompromisse eingegangen werden. Hinsichtlich des Zielkonflikts hat sich deshalb das Konzept rekonfigurierbarer Bearbeitungssysteme (vgl. KOREN ET AL. 1999) etabliert, wobei deren industrieller Einsatz infolge technischer und wirtschaftlicher Herausforderungen bis dato nicht im gewünschten Maße erfolgt ist (SELIG 2011, WIENDAHL & WIENDAHL 2020). Im Industrie 4.0-Kontext wird daher die Entwicklung CPPS-basierter Fertigungseinrichtungen verfolgt (STEHLE & HEISEL 2017, HEINRICH ET AL. 2020, HUMPERT ET AL. 2024). Durch deren modularen Aufbau sowie verbesserter Informations- und Kommunikationstechnologie (IuK-Technologie) sind diese schnell an neue Anforderungen adaptierbar oder in der Lage sich eigenständig anzupassen, wodurch eine

effiziente Produktion in der individuellen Serienfertigung ermöglicht wird (HEINRICH ET AL. 2020, HUMPERT ET AL. 2024).

In der Literatur gibt es keine allgemeingültige Begriffsdefinition für **CPPS**. Es ist aber grundsätzlich aus der Übertragung des Konzepts Cyber-physischer Systeme (CPS) in die industrielle Produktionsumgebung ableitbar (VOGEL-HEUSER ET AL. 2015a, BAUERNHANSLE ET AL. 2016). In dieser Arbeit ist deshalb, aufbauend auf der Definition von CPS (vgl. GEISBERGER ET AL. 2011, GEISBERGER ET AL. 2012, DROSSEL ET AL. 2018) sowie in Anlehnung an Arbeiten im CPPS-Kontext (vgl. MONOSTORI ET AL. 2016, BAUERNHANSLE 2017, PANTFÖRDER ET AL. 2017, WESTERMANN 2017), ein CPPS anhand folgender Merkmale definiert.

Die Begrifflichkeit CPPS bezeichnet ein *System* als Verbund intelligenter Objekte (z. B. Produkte, Betriebsmittel, Subsysteme), die über *Informationsnetze* kommunizieren und Dienste nutzen. Es erfasst damit die reale Produktion durch *Sensoren*, wertet diese mittels *Informationsverarbeitung* und weltweit verfügbarer *Daten* und *Dienste* aus und wirkt auf diese durch *Aktoren* ein bzw. interagiert mit der realen und virtuellen Welt. Der Mensch nimmt über Mensch-Maschine-Schnittstellen, in Englisch Human Machine Interface (*HMI*), entsprechend Einfluss.

Zudem kann ein CPPS im Sinne des Systemgedankens (vgl. Abschnitt 2.1.1) wiederum als intelligentes Objekt eines übergeordneten CPPS dienen (PANTFÖRDER ET AL. 2017, KAUFMANN & FORSTNER 2017). Ein CPPS ermöglicht demzufolge die durchgängige, informationstechnische Kopplung von realer („physisch“) und virtueller („cyber“) Welt in der Produktionsumgebung (VDI/VDE 2013, MONOSTORI ET AL. 2016).

2.2.2 Fertigungssystem mit CPPS-Strukturen

Der Aufbau eines **Fertigungssystems mit CPPS-Strukturen** (Abbildung 11) beinhaltet, neben dessen Hierarchieebenen (vgl. Abschnitt 2.1.1), die zum Betrieb erforderlichen Elemente. Das Fertigungssystem besteht aus Fertigungszellen, die in ein Ver- und Entsorgungs- sowie CPPS-basiertes Steuerungs- und Kommunikationssystem (vgl. Abschnitt 2.2.3) eingebettet sind (vgl. Abschnitt 2.1.1 und 2.1.5). Neben Produkten bzw. Werkstückträgern, Maschinen und Transportsystemen stellen die Fertigungszellen intelligente Objekte (vgl. Abschnitt 2.2.4) innerhalb des CPPS-basierten Fertigungssystems dar. Wird die durchgängige CPPS-spezifische Betrachtung auf die Ressourcen in Fertigungszellen (vgl. Abschnitt 2.2.5) erweitert, kann eine Fertigungszelle ein eigenes CPPS innerhalb des

CPPS-Netzwerks des Fertigungssystems repräsentieren. Darüber hinaus ist der Mensch über mobile und stationäre Endgeräte sowie anderweitige HMI mit dem CPPS verbunden und kann darauf einwirken.

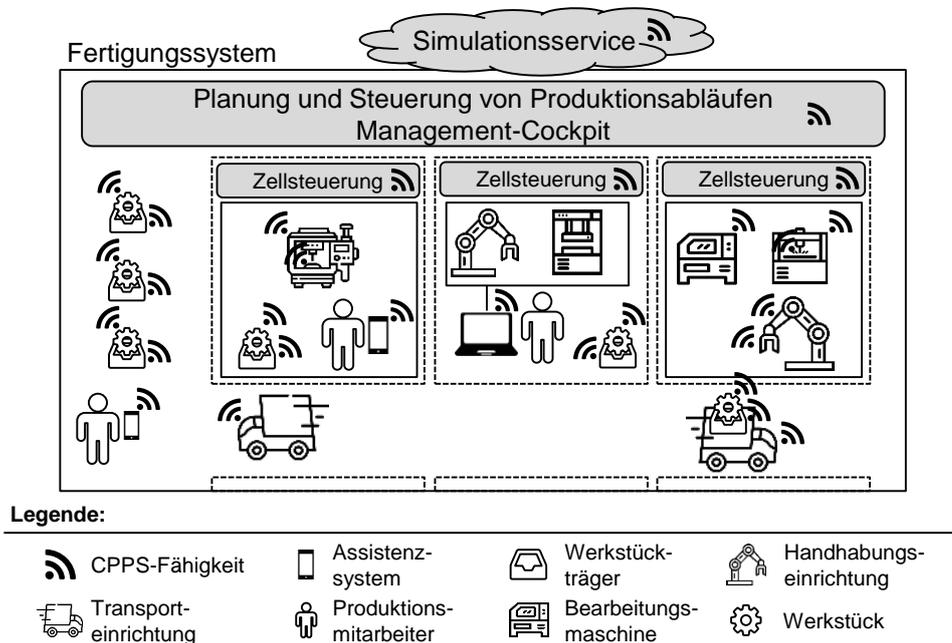


Abbildung 11: Bestandteile eines Fertigungssystems mit CPPS-Strukturen aufbauend auf WESTKÄMPER (2006), WESTKÄMPER & ZAHN (2009), REINHART ET AL. (2013) und REINHART & ZÜHLKE (2017)

Durch die Einführung des CPPS-Paradigmas und der damit einhergehenden Datenverfügbarkeit, Vernetzung und Informationsverarbeitung nimmt insgesamt der zu erreichende Automatisierungsgrad im Fertigungssystem deutlich zu (VDI/VDE 2013). So ergeben sich zahlreiche **CPPS-spezifische Anwendungen** bzw. Dienste z. B. im Sinne regelmäßiger oder permanenter Anlagendiagnostik (vgl. z. B. LEE & WANG 2008, VOGEL-HEUSER ET AL. 2015b), integrierter Prozess- und Qualitätskontrolle (vgl. z. B. CASTELLINI ET AL. 2011, VOGEL-HEUSER ET AL. 2015a) oder situationsspezifischer Selbstadaptation von Anlagen (vgl. z. B. VOGEL-HEUSER ET AL. 2015b, VOGEL-HEUSER 2017). Ebenso werden Rekonfigurationen durch „Plug & Produce“-fähige Module gefördert (vgl. z. B. STEHLE & HEISEL 2017, DÜRKOP & JASPERNEITE 2017, HAMMERSTINGL 2020).

Als genereller Leitfaden zum sukzessiven Aufbau eines CPPS dient beispielweise das **5C-Architekturmodell** (Abbildung 12) nach LEE ET AL. (2015). Es beschreibt in fünf Leistungsstufen den Weg von der initialen Datenerfassung über die Informationsverarbeitung bis hin zur selbstständigen Ausführung. Die erste Stufe stellt die Datenakquise und Vernetzung einzelner Komponenten und Maschinen in der

physischen Welt dar, während die Stufen 2 bis 4 die darauf basierende Informationsverarbeitung in der virtuellen („cyber“) Welt ermöglichen. Auf zweiter Stufe werden die Daten ausgewertet und zur Vorhersage potenzieller Störungen genutzt. Zur weiterführenden Synthese im Systemverbund liegen in der dritten Stufe zu den Maschinen und Komponenten digitale Repräsentanten vor, um anhand des Vergleichs zwischen Echtzeitdaten und historischen Daten das Systemverhalten vorherzusagen. In der vierten Stufe findet die Ableitung und Priorisierung von Handlungsalternativen statt, die den Menschen zur Entscheidungsunterstützung bereitgestellt werden. Ist darüber hinaus die automatische Rückkopplung der Ergebnisse von der virtuellen in die physische Welt verwirklicht, kann sich auf der fünften Stufe eine Maschine oder das Produktionssystem eigenständig konfigurieren.

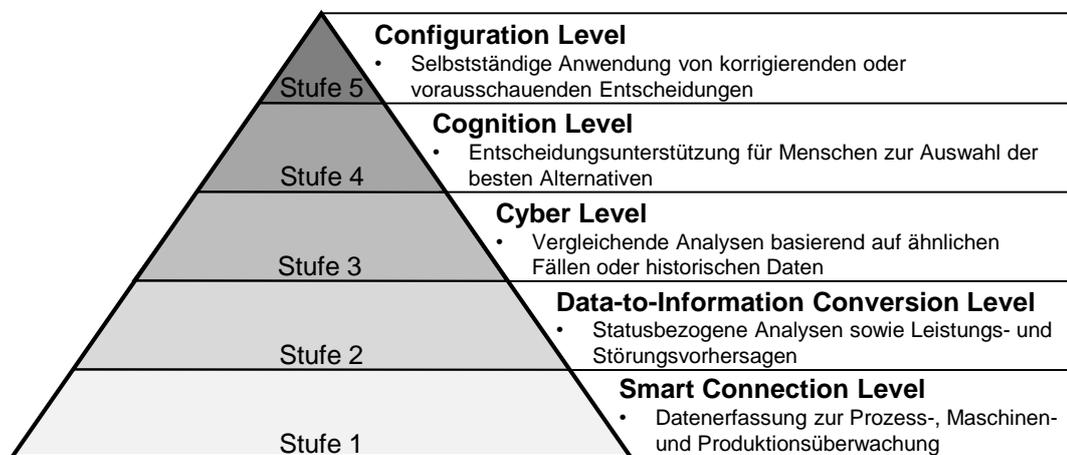


Abbildung 12: 5C-Architektur für die Implementierung von CPPS in Anlehnung an LEE ET AL. (2015) und MONOSTORI ET AL. (2016)

2.2.3 CPPS-basierte Steuerungs- und Kommunikationsstruktur

Die Einführung des CPPS-Paradigmas erfordert die Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide (Abbildung 13) durch dezentral verteilte Steuerungseinheiten (VDI/VDE 2013, MONOSTORI ET AL. 2016, GORECKY ET AL. 2017). Das Fundament der hierarchischen Pyramide bildet die Feldebene mit Aktoren und Sensoren, deren Signale in der Steuerungsebene mittels speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS) für die Regelung und Steuerung von Automatisierungsvorgängen verarbeitet werden. Für die Überwachung und Bedienung der Automatisierungssysteme ist die SPS dazu in der Prozessleitebene mit Supervisory Control and Data Acquisition-Systemen (SCADA-Systemen) verbunden, die wiederum mit einem Manufacturing Execution System (MES) hinsichtlich der Produktionspla-

nung und -steuerung auf der Betriebsleitebene verknüpft sind. Auf der darüber liegenden Unternehmensleitebene findet die Steuerung des Unternehmens mithilfe eines Enterprise Resource Planning-Systems (ERP-System) statt. Da der Informationsaustausch in dieser zentral hierarchischen **Kommunikations- und Steuerungsstruktur** zu starr und unflexibel für situationsspezifische Anpassungen in der individualisierten Serienfertigung ist, wird eine Aufteilung der Steuerungsaufgaben auf selbständige und miteinander kooperierender Geräte und Anlagen (Steuerungseinheiten) in einer dezentral verteilten Kommunikations- und Steuerungsstruktur (CPPS-basierte Automation) angestrebt (VDI/VDE 2013, GORECKY ET AL. 2017).

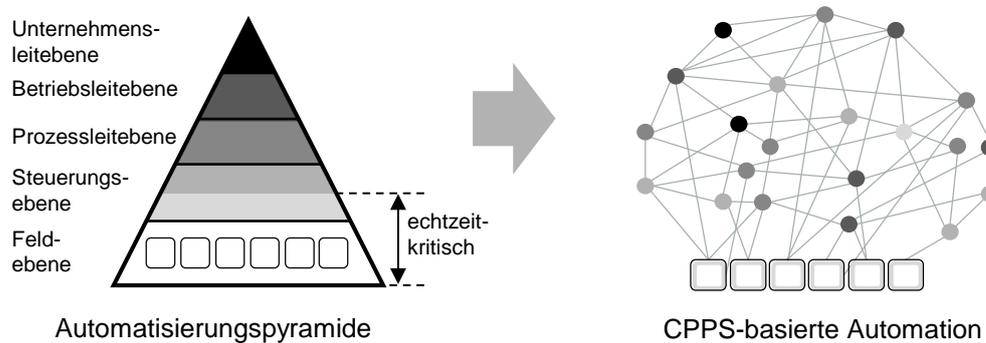


Abbildung 13: Auflösung der Automatisierungspyramide nach VDI/VDE (2013)

Um eine Vielzahl an heterogenen Geräten und Anlagen innerhalb eines CPPS-Netzwerks zu koppeln, stellen Serviceorientierte Architekturen (SOA) und Multi-Agenten-Systeme (MAS) geeignete Lösungsansätze dar (VOGEL-HEUSER ET AL. 2015a, VOGEL-HEUSER 2017). Ein **Agent** ist nach VDI/VDE 2653 definiert als eine abgrenzbare (Hardware- und bzw. oder Software-) Einheit, die bestrebt ist, definierte Ziele durch ein eigenständiges Verhalten zu erzielen und dafür mit der Umgebung und weiteren Agenten interagiert. Demgemäß umfasst ein **MAS** eine Menge an Agenten, die innerhalb einer definierten Systemgrenze miteinander interagieren, um eine oder mehrere Aufgaben zu erfüllen (VDI/VDE 2653). Die **SOA** stellt dagegen ein abstraktes, technologieunabhängiges Architekturmuster für ein verteiltes System dar, bei dem alle Teilnehmer als Dienstanbieter und Dienstanutzer über einen zentralen Vermittler zunächst Dienste erfragen bzw. anbieten, bevor eine direkte Zusammenarbeit erfolgt (MASAK 2007, GOLL 2011). An der Entwicklung einer solchen Referenzarchitektur für ein CPPS-Netzwerk wird allerdings noch gearbeitet (VOGEL-HEUSER 2017).

Ein Forschungsverbund (vgl. VOGEL-HEUSER ET AL. 2015a, PANTFÖRDER ET AL. 2017, VOGEL-HEUSER 2017) zeigt eine auf den bestehenden Standards der

Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) entwickelte **Architektur eines CPPS-Netzwerks** (Abbildung 14) mit SOA, bei der über Agenten kommuniziert wird. Dazu sind die vorhandenen Fertigkeiten von Anlagen bzw. deren Module mittels Agenten abgebildet und werden in der agentenorientierten Cloud-Plattform hinsichtlich ihrer Dienste und Eigenschaften gekapselt und angeboten (VOGEL-HEUSER 2017). Die Kommunikation innerhalb des CPPS-Netzwerks erfolgt dabei über ein lokales Netzwerk oder das Internet.

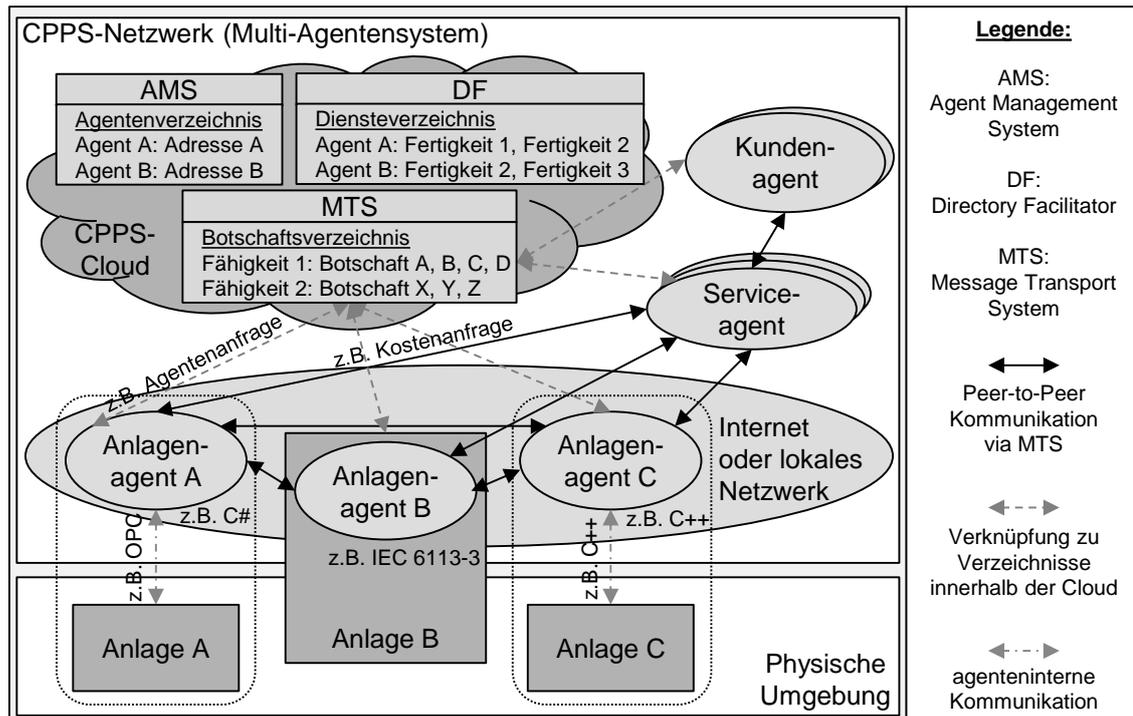


Abbildung 14: Architektur eines agentenbasierten CPPS-Netzwerkes in Anlehnung an VOGEL-HEUSER ET AL. (2015a), VOGEL-HEUSER (2017) und PANTFÖRDER ET AL. (2017)

Ein Anlagenagent kann in beliebigen Sprachen (z. B. IEC 61131-3, C++, C#) implementiert werden und deren Anbindung direkt in der Anlage mit einem Steuerungsprogramm auf einer SPS, auf einer zusätzlichen Hardware (z. B. PC) oder über weitere existierende Agentenplattformen (z. B. JADE-Plattform) erfolgen (VOGEL-HEUSER ET AL. 2015a). Die Kommunikation zwischen den Anlagenagenten untereinander und mit den Verzeichnissen erfordert jedoch eine gemeinsame Sprache (z. B. FIPA-ACL) zur Gewährleistung der Interoperabilität (VOGEL-HEUSER ET AL. 2015a, PANTFÖRDER ET AL. 2017). Die Sprache für die agenteninterne Kommunikation (z. B. über OPC, C++) kann dagegen herstellerspezifisch umgesetzt sein (PANTFÖRDER ET AL. 2017). Somit ist auch eine Einbindung von älteren

oder bestehenden Anlagen mit konventionellen Schnittstellen in die CPPS-Umgebung möglich (VOGEL-HEUSER ET AL. 2015a, PANTFÖRDER ET AL. 2017).

Neben den Anlagenagenten sind sowohl Kundenagenten zur Einbringung von Kundenbedarfen bzw. Aufträgen in das Agentensystem als auch Serviceagenten (Dienste) für die Umsetzung von z. B. Auftragskoordination, Anlagendiagnostik oder Prozess- und Qualitätssicherung vorhanden. Insofern ein solcher Agent in der CPPS-Cloud registriert wird, ist dieser in der Lage direkt mit den Anlagenagenten zu kommunizieren. Dazu sind dezentral in der Cloud ein Agentenverzeichnis im Agent Management System (AMS) für die Zuordnung zwischen Namen und IP-Adressen der Agenten, ein Dienstverzeichnis im Directory Facilitator (DF) mit den Fertigkeiten und Verfügbarkeiten jedes Agenten sowie ein zum Message Transport System (MTS) zugehöriges Botschaftsverzeichnis für die zu einer Fertigkeit gehörenden Protokolle und Nachrichten abgelegt. (VOGEL-HEUSER ET AL. 2015a, PANTFÖRDER ET AL. 2017)

Ein CPPS-Netzwerk erfordert für den Informationsaustausch zusätzlich zur durchgängigen Kommunikationsinfrastruktur und deren Kommunikationsstandards einheitliche **Informationsmodelle** (VOGEL-HEUSER 2017, GORECKY ET AL. 2017). Diese Modelle beruhen dazu auf Modellierungsstandards (z. B. AutomationML, STEP) und ermöglichen die eindeutige und verständliche Beschreibung relevanter Informationen und Daten für verschiedene Stakeholder entlang des Produktentstehungsprozesses und der Wertschöpfungskette (GORECKY ET AL. 2017). Beispielsweise befähigen Maschinendatenmodelle damit die Integration heterogener Betriebsmittel in ein CPPS-Netzwerk (vgl. GORECKY ET AL. 2017). Für eine Übersicht an Kommunikationsstrukturen, -protokollen und Informationsmodellen sei auf weiterführende Literatur (vgl. z. B. GORECKY ET AL. 2017) verwiesen.

2.2.4 Intelligente Objekte im CPPS

Intelligente Produkte und Produktionsmittel stellen die zentrale Grundlagen zur Verknüpfung der realen und virtuellen Welt im CPPS dar und sind dem Themenfeld der intelligenten Objekte zugeordnet (vgl. z. B. WONG ET AL. 2002, MCFARLANE ET AL. 2003, NOCHTA 2008, ZBIB ET AL. 2010, SANCHEZ LOPEZ ET AL. 2011, DEINDL 2013, GONZALEZ GARCIA ET AL. 2017, LEWIN & FAY 2018). **Intelligente Objekte** haben ihren Ursprung in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen (vgl. VASSEUR & DUNKELS 2010), unterliegen jedoch keiner einheitlichen Definition (KORTUEM ET AL. 2010, SÁNCHEZ LÓPEZ ET AL. 2011, DEINDL 2013). In dieser Arbeit wird, angelehnt an SÁNCHEZ LÓPEZ ET AL. (2011) und DEINDL (2013), unter

einem intelligenten Objekt ein materielles betriebliches Objekt verstanden, das mit eingebetteten IuK-Technologien eine Zusatzfunktion im betrieblichen Kontext ermöglicht. Grundlegende physische Funktionen sind demnach um digitale bzw. **intelligente Funktionen** (z. B. Speicher-, Identifizier-, Kommunikationsfähigkeit) erweitert (NOCHTA 2008, MATTERN & FLÖRKEMEIER 2010, LEWIN & FAY 2018).

Die technischen Komponenten bzw. **Architekturelemente** (Abbildung 15) eines intelligenten Objektes lassen sich in Bezug auf ein mechatronisches System beschreiben (DEINDL 2013, BARTODZIEJ 2017). In diesem Zusammenhang muss ein intelligentes Objekt als Grundvoraussetzung zumindest eindeutig anhand natürlicher Identifizierungsmerkmale (z. B. Form, Oberflächenbeschaffenheit) oder künstlich mithilfe eines passiven, semi-aktiven oder aktiven Identifikators (z. B. RFID, Barcode) identifizierbar sein, um in die digitalen Prozesse eingebunden zu werden (SÁNCHEZ LÓPEZ ET AL. 2011, DEINDL 2013, ADOLPHS ET AL. 2015). Optional kann ein intelligentes Objekt über die weiteren Architekturelemente Kommunikationsschnittstelle, Informationsspeicherung, -verarbeitung, Sensorik, Aktorik und Energieversorgung verfügen (DEINDL 2013, LEWIN & FAY 2018).

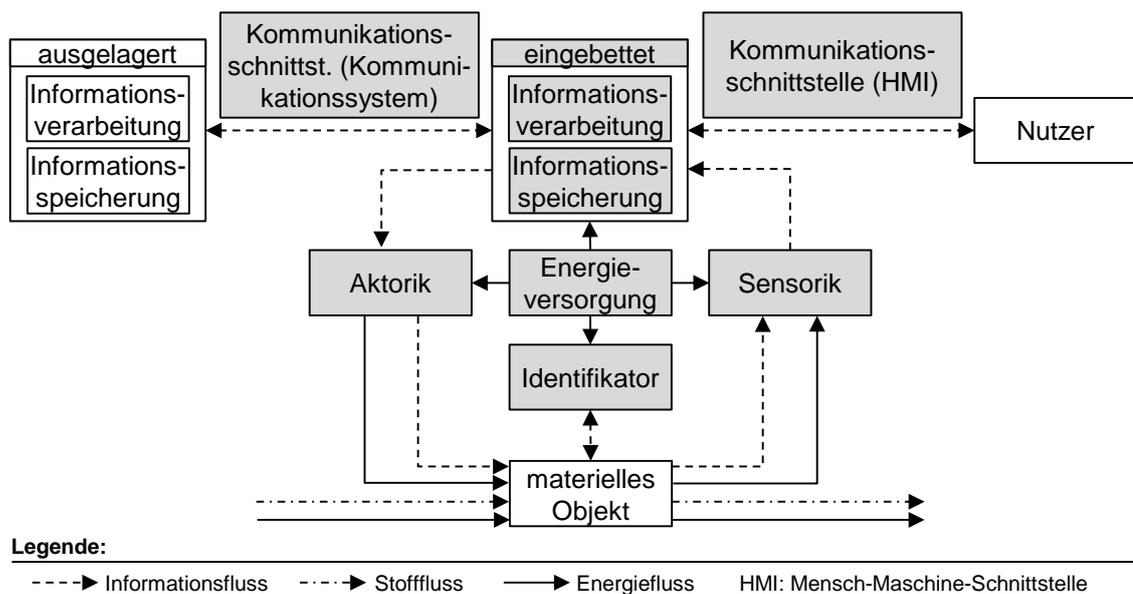


Abbildung 15: Architekturelemente intelligenter Objekte in Anlehnung an VDI 2206 und DEINDL (2013)

Eingebettete **IuK-Technologien** in materiellen Objekten erfordern häufig eine kabelgebundene oder integrierte *Energieversorgung* (z. B. Batterie, Netzanschluss). Die eigentliche *Informationsverarbeitung* kann intern über Prozessoren, ausgelagert in externen Informationssystemen oder als Kombination aus beiden stattfinden. Ebenso verhält es sich mit der *Informationsspeicherung*, wobei die interne

Datenspeicherung über eingebettete Arbeits-, in Englisch Random Access Memory (RAM), und Sekundärspeicher (z. B. Festplatte, USB-Speicherstick), in Englisch Read Only Memory (ROM), möglich ist. Für die HMI (z. B. über Displays, Kontrollleuchten) oder das Kommunikationssystem (z. B. über Bluetooth, UMTS, WLAN) werden wiederum kabelgebundene oder drahtlose *Kommunikationsschnittstellen* verwendet. Zudem lassen sich die Daten über den eigenen Objektzustand und dessen Umgebung mithilfe von *Sensorik* (z. B. Temperatur-, Drucksensor) erfassen. Dagegen erfolgt im Objekt selbst und zur Manipulation von dessen Umwelt die Ausführung physischer Aktionen für getroffene Entscheidungen durch *Aktorik*. (DEINDL 2013, LEWIN & FAY 2018)

Abhängig vom Grad der Entscheidungsfähigkeit (Autonomie- bzw. Selbststeuerungsgrad) lassen sich bei der **Art der Informationsverarbeitung** in technischen Systemen grundsätzlich verschiedene, aufeinander aufbauende Stufen des Systemverhaltens (Abbildung 16) unterscheiden. Diese Stufen reichen vom fremdbestimmten über das regelbasierte bis hin zum selbstlernenden System, wobei erstere der extrinsischen und die weiteren der intrinsischen Entscheidungsfindung zugeordnet sind (FRANKE ET AL. 2010, BÖSE 2012).

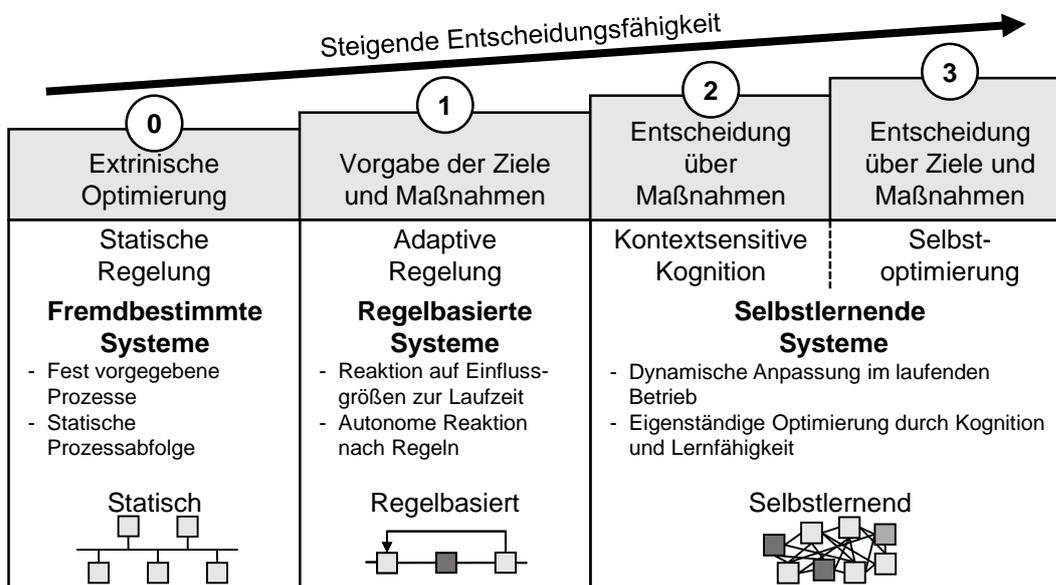


Abbildung 16: Stufen des Systemverhaltens abhängig vom Grad der Entscheidungsfähigkeit aufbauend auf FRANKE ET AL. (2010), SCHMITT ET AL. (2011), SCHLICK ET AL. (2017) und MÜLLER ET AL. (2017)

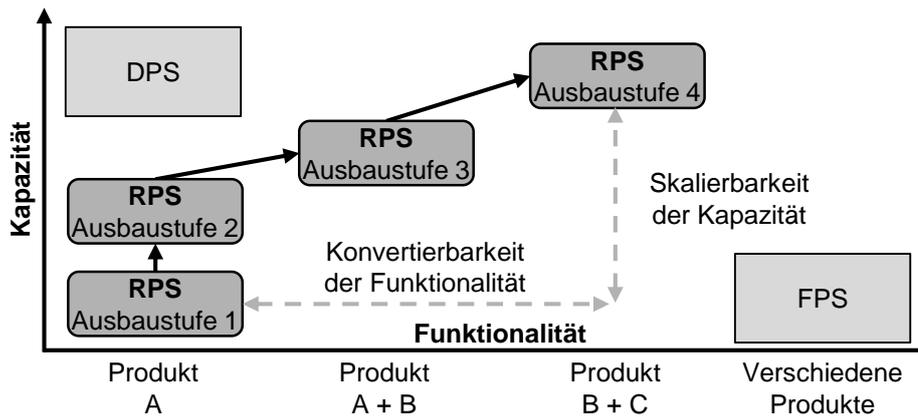
Fremdbestimmte Systeme sind durch Dritte bestimmt und verfügen über keine eigene Entscheidungsfähigkeit. Somit bedarf es zumindest regelbasierter Systeme für die Umsetzung von situationsbezogenem Steuerungsverhalten (STRUBE 1996,

FRANKE ET AL. 2010, SCHOLZ-REITER & SOWADE 2011, GAUSEMEIER ET AL. 2018). Während ein *regelbasiertes System* lediglich auf wahrgenommene Ereignisse durch festgelegte statische Bedingungs-Aktions-Regeln für ein definiertes Ziel flexibel reagiert, kann ein *selbstlernendes System* mittels eigener Wissensbasis Aktionen planen und proaktiv bezüglich dynamischer Umgebungseinflüsse handeln (FRANKE ET AL. 2010, GAUSEMEIER ET AL. 2018). Hierbei wird zwischen einem kontextsensitiv kognitiven und selbstoptimierenden System differenziert (SCHLICK ET AL. 2017, MÜLLER ET AL. 2017). Im Gegensatz zu ersterem, das eigenständig über Maßnahmen für ein vorgegebenes Ziel entscheidet, kann ein selbstoptimierendes System auch dessen Ziel nach dem Gesamtnutzen des übergeordneten Systems optimieren (SCHLICK ET AL. 2017, MÜLLER ET AL. 2017).

2.2.5 Rekonfigurierbare Fertigungszellen in CPPS-Strukturen

Neben der produktbasierten Produktions- und Anlagensteuerung liegt ein wesentliches Potenzial von CPPS in der Möglichkeit, Fertigungseinrichtungen an Veränderungstreiber anzupassen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die CPPS-basierten Einrichtungen basieren dazu auf einer modularen Grundstruktur und unterstützen mit inhärenter IuK-Technologie deren „Plug & Produce“-fähige Rekonfiguration (vgl. Abschnitt 2.1.4 und 2.2.1). In diesem Sinne sind CPPS als Befähiger des **rekonfigurierbaren Fertigungsparadigmas** (vgl. KOREN ET AL. 1999) zu verstehen (vgl. STEHLE & HEISEL 2017, HAMMERSTINGL 2020).

Ein Schlüsselfaktor dieser Art von Fertigungseinrichtungen ist die im Vergleich zum flexiblen und dedizierten Fertigungskonzept (vgl. Abschnitt 2.2.1) einfachere und schnellere Anpassungsfähigkeit (Abbildung 17) in Bezug auf Skalierbarkeit (vgl. Abschnitt 2.1.3) der Kapazität und Konvertibilität der Funktionalität (KOREN ET AL. 1999, WIENDAHL ET AL. 2007, SINGH ET AL. 2017). Um Veränderungstreibern entgegenzuwirken, bietet eine Konfiguration daher die erforderliche Flexibilität für spezifische Teilefamilien (vgl. Abschnitt 2.1.1) und ist inkrementell hinsichtlich Kapazität und Funktionalität rekonfigurierbar (MEHRABI ET AL. 2002, ELMARAGHY 2006). Folglich kann zu jeder Ausbaustufe, die die zu einem zeitlichen Lebenszyklusabschnitt (vgl. Abschnitt 2.3.2) zugeordneten Konfigurationen umfasst (KLUGE 2011), möglichst nahe am optimalen Betriebspunkt produziert werden. Beispielsweise ist eine Initialkonfiguration (Ausbaustufe 1) mit der notwendigen Kapazität für die Teilefamilie A ausgelegt, bevor diese in der folgenden Ausbaustufe hinsichtlich erhöhter Kapazitätsanforderungen angepasst wird. Soll zusätzlich die Teilefamilie B in der darauffolgenden Ausbaustufe integriert werden, kann dies neben der Kapazitäts- auch eine Funktionalitätsänderung erfordern.



Legende:

DPS: Dediziertes Produktionssystem FPS: Flexibles Produktionssystem RPS: Rekonfigurierbares Produktionssystem

Abbildung 17: Rekonfiguration hinsichtlich Kapazität und Funktionalität in Anlehnung an KOREN ET AL. (1999)

Die in der Arbeit betrachteten rekonfigurierbaren Fertigungszellen sind in ein Fertigungssystem mit CPPS-Strukturen (vgl. Abschnitt 2.2.2) eingebettet und beinhalten eine Arbeitsstation oder Aneinanderreihung von Stationen zu einem Layout (vgl. Abschnitt 2.1.1), die durch Betriebsmitteln umgesetzt sind. Die Anbindung einer Zellkonfiguration ins CPPS-Netzwerk (vgl. Abschnitt 2.2.3) kann dabei als Agent oder eigenes CPPS (Agentensystem) erfolgen. Ebenso sind lediglich einzelne Betriebsmittel bzw. Geräte integrierbar. **Rekonfigurierbare Fertigungszellen in CPPS-Strukturen** (Abbildung 18) sind somit während des Lebenszyklus in der Struktur sowie im hard- und softwaretechnischen Aufbau veränderbar.

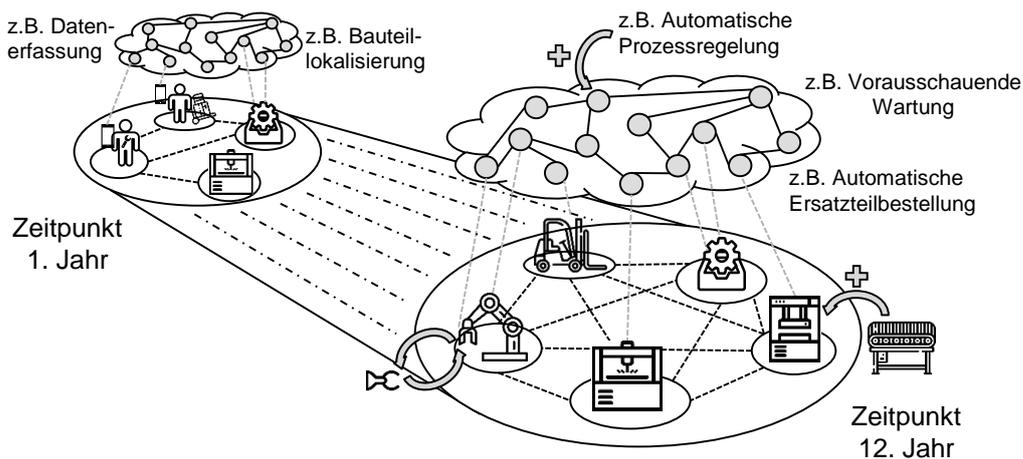


Abbildung 18: Beispielhafte Entwicklung einer rekonfigurierbaren Fertigungszelle in CPPS-Strukturen aufbauend auf WESTERMANN (2017)

Fertigungszellen als Grundkomponenten der Automatisierung (vgl. WESTKÄMPER 2006) können grundsätzlich unterschiedliche **Automatisierungsgrade** aufweisen. In der Vergangenheit lag das Augenmerk vor allem auf der mechanischen Automatisierung physischer Prozesse, wie Bearbeitungs-, Handhabungs- und Transportvorgängen, und weniger auf der Informationsautomatisierung, bei der Daten unter anderem im Hinblick auf Produkt und Prozess sowie deren Verarbeitung und Transparenz im Mittelpunkt stehen (FROHM ET AL. 2005, BOGNER ET AL. 2017). Mit der Einbindung ins CPPS-Netzwerk (vgl. Abschnitt 2.2.3) kann der Automatisierungsgrad demnach auch in dieser Hinsicht deutlich angepasst werden. Kognitive Tätigkeiten, wie Planungs-, Steuerungs- und Überwachungsaufgaben, werden dazu von einer CPPS-basierten Steuerungseinheit ausgeführt (NYHUIS ET AL. 2014). Neben der Integration neuartiger Steuerungseinheiten bzw. Dienste (vgl. Abschnitt 2.2.2 und 2.2.3) lassen sich auch bestehende modifizieren oder entfernen (MONOSTORI ET AL. 2016).

2.3 Planung modularer, skalierbarer Produktionssysteme

Dieser Abschnitt widmet sich der Planung von Produktionssystemen. Dazu wird eingangs auf Allgemeines zur Produktionssystemplanung (Abschnitt 2.3.1) eingegangen, bevor die Besonderheiten zur lebenszyklusorientierten Grobplanung (Abschnitt 2.3.2) modularer, skalierbarer Produktionssysteme dargelegt werden. Daran anknüpfend stehen deren technische (Abschnitt 2.3.3) und kapazitätsbezogene Auslegung (Abschnitt 2.3.4) sowie eine Kosten- und Leistungsbewertung (Abschnitt 2.3.5) im Fokus.

2.3.1 Allgemeines zur Produktionssystemplanung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen. In diesem Zusammenhang wird unter dem Begriff **Methodik** ein System von Modellen, Methoden und Hilfsmitteln verstanden, das zur Lösung einer theoretischen und bzw. oder praktischen Aufgabenstellung dient (HEYN 1999, NEUHAUSEN 2001). Der Begriff **Planung** bezeichnet dabei die gedankliche Vorwegnahme erforderlicher Handlungsschritte zur effektiven Erreichung eines angestrebten Ziels (VDI 5200) und lässt sich in ein Handlungs-, Objekt- und Zielsystem untergliedern (SCHNEEWEIß 1991).

Die Planung von Produktionssystemen erfolgt im Rahmen der **Fabrikplanung**. Die Planungsobjekte (Ressourcen) einer Fabrik werden hierbei nach einem Top-

Down-Ansatz in einzelne Hierarchieebenen (vgl. Abschnitt 2.1.1) gegliedert sowie sequenziell und gegebenenfalls iterativ entlang eines phasenorientierten Planungsprozesses in Abhängigkeit von den Fabrik- und Projektzielen (z. B. Veränderungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit) wie auch unter Zuhilfenahme von Methoden, Modellen und Werkzeugen bearbeitet (VDI 5200, SCHENK ET AL. 2014). Dabei wird eine möglichst optimale Ressourcenkombination in der Produktion angestrebt und deren kontinuierliche Anpassung an Veränderungen (vgl. Abschnitt 2.1.2) berücksichtigt (WIENDAHL ET AL. 2014, SCHENK ET AL. 2014).

Im Hinblick auf die Planungsebenen wird gemäß PAWELLEK (2014) zwischen der Strategie- (Standort), Struktur- (Fabrik- bzw. Werkstruktur) und Systemplanung (Fertigungs- und Montagesystem, etc.) differenziert. Folglich wird in dieser Arbeit von **Produktions- bzw. Fertigungs- und Montagesystemplanung** als Teil der Fabrikplanung gesprochen (vgl. PAWELLEK 2014). Die damit stattfindende Entwicklung eines Produktionssystems stellt einen gestalterisch-kreativen Prozess dar, weshalb entsprechende Planungsvorgehensweisen (vgl. z. B. VDI 5200, PAWELLEK 2014, GRUNDIG 2018) grundsätzlich ähnlich dem allgemeinen Problemlösungszyklus (vgl. z. B. PAWELLEK 2014) gegliedert sind (WIENDAHL 1999).

Im Wesentlichen lassen sich die klassischen Vorgehensweisen in fünf **Planungsphasen** (Abbildung 19) mit zunehmendem Detaillierungsgrad zusammenführen: Vorbereitung, Grob-, Detail-, Ausführungsplanung und Ausführung (vgl. z. B. BERGHOLZ 2006, SINNWELL 2020). Ausgehend von der Zielfestlegung und der Grundlagenermittlung in der Vorbereitungsphase werden in der Grobplanung zunächst mögliche Lösungsvarianten des zu planenden Produktionssystems erarbeitet, bevor eine ausgewählte Vorzugsvariante in der Detailplanung ausdetailliert wird (VDI 5200, GRUNDIG 2018). Für deren Realisierung erfolgt anschließend die Ausführungsplanung und die Ausführung. Im Fokus dieser Arbeit steht insbesondere die Grobplanung, die sich wiederum in die Phasen Strukturplanung, Dimensionierung, Ideal- und Realplanung untergliedert (VDI 5200, GRUNDIG 2018).

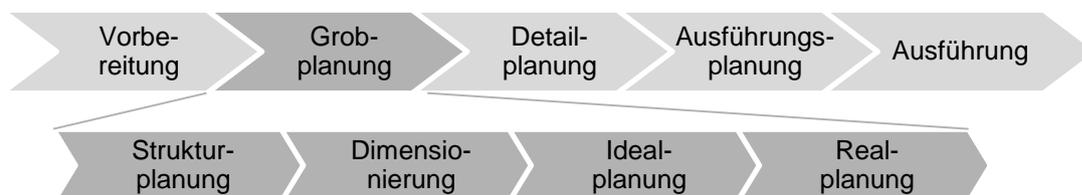


Abbildung 19: Phasenmodell der Fabrik- bzw. Produktionssystemplanung aufbauend auf VDI 5200

Aufbauend auf den Ergebnissen der Vorbereitung geht aus der **Strukturplanung** die relevante Produktionsprozessabfolge eines Produktionssystems hervor. Dazu werden die funktionalen Einheiten mit deren gegenseitigen Beziehungen entsprechend eines ausgewählten Fertigungsprinzips (vgl. Abschnitt 2.1.1) definiert (VDI 5200, WIENDAHL ET AL. 2014). Zur **Dimensionierung** der einzelnen Funktionseinheiten bzw. Teilsysteme erfolgt die Festlegung der Art und Anzahl von Betriebsmittel und Personal sowie der dafür erforderlichen Flächen- und Medienbedarfe (VDI 5200, WIENDAHL ET AL. 2014, GRUNDIG 2018). Anschließend findet die räumliche Anordnung der dimensionierten Einheiten in Form von **Ideal- und Reallayout** statt, wobei ersteres restriktionsfrei entworfen wird und darauf aufbauende Reallayouts abhängig von den gegebenen Restriktionen gestaltet werden (VDI 5200, PAWELLEK 2014, GRUNDIG 2018).

2.3.2 Lebenszyklusorientierte Grobplanung

Die Grobplanung eines Produktionssystems ist stark vom aktuellen und zukünftig zu produzierenden Werkstückspektrum, der Zielsetzung (z. B. Produktivität, Flexibilität, Kosten) und den gegebenen Randbedingungen (z. B. Fertigungskonzept) geprägt (vgl. EVERSHEIM 1989). Ausgehend von der Festlegung der Funktionsstruktur erfolgt im Grunde zunächst die Ausrüstungs- bzw. Betriebsmitteldimensionierung, bevor davon die weiteren Bedarfsgrößen (z. B. Personal, Fläche) abgeleitet werden und die anschließende Layoutplanung stattfindet (GRUNDIG 2018, WIENDAHL & WIENDAHL 2020). Im Gegensatz zur statischen wird bei der dynamischen Dimensionierung die im Rahmen der Veränderungsfähigkeit (vgl. Abschnitt 2.1.2) relevante, zeitabhängige Veränderlichkeit von Bedarfsgrößen über den Betrachtungszeitraum berücksichtigt (SCHENK ET AL. 2014, GRUNDIG 2018).

Zur Auslegung modularer, skalierbarer Produktionssysteme (vgl. Abschnitt 2.2.5) entsprechend den zeitbezogenen Anforderungen des Fertigungsprogramms ist daher dessen **Lebenszyklus** (Abbildung 20) ganzheitlich zu betrachten (WESTKÄMPER 2003, BLUMENAU 2006, HEINEN ET AL. 2008). Somit wird sich auf künftige Entwicklungen von Teilefamilien mit deren Stückzahlen und weiterer Veränderungstreiber (vgl. Abschnitt 2.1.2) gestützt, die mithilfe der Szenariotechnik (vgl. z. B. GAUSEMEIER ET AL. 1996, FINK & SIEBE 2016) prognostizierbar sind (HERNÁNDEZ MORALES 2003, BLUMENAU 2006). Der Lebenszyklus eines skalierbaren Produktionssystems gliedert sich in Lebenszyklusphasen, ausgehend von der Entstehungs-, Betriebs-, Rekonfigurations- bis zur Dekompositionsphase (vgl. z. B. KOREN ET AL. 1999, DRABOW 2006, KLUGE 2011). Dabei entstehen mehrere Ausbaustufen (vgl. Abschnitt 2.2.5), weshalb in diesem Zusammenhang auch vom

Ausbaustufenkonzept gesprochen wird (vgl. z. B. SLAMA 2004, KLUGE 2011, EILERS 2015). Die Initialkonfiguration als Konfiguration der ersten Ausbaustufe stellt die wichtigste dar, da hierauf die Konfigurationen der weiteren Ausbaustufen chronologisch aufbauen (Ausbaustufenfolgen).

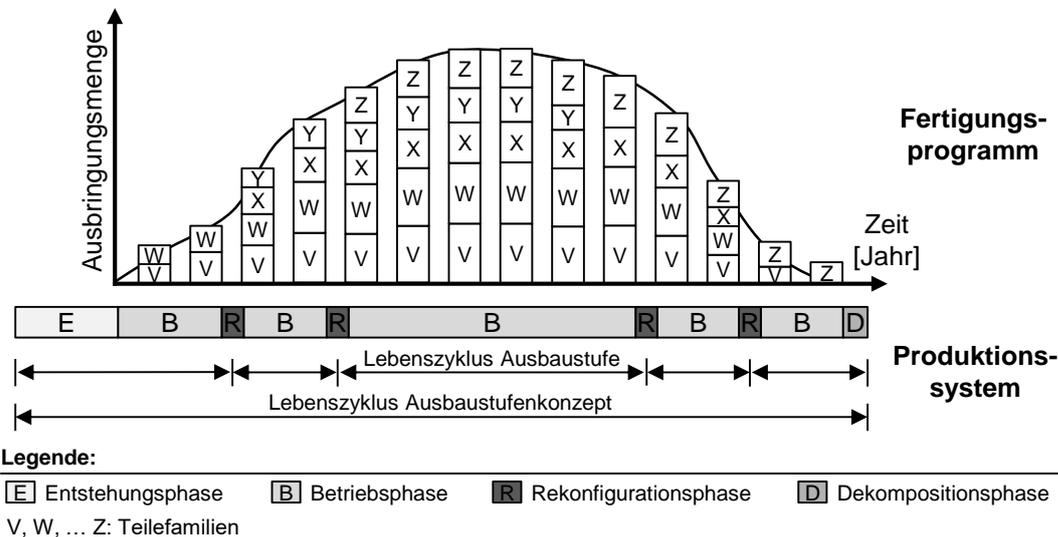


Abbildung 20: Lebenszyklusphasen skalierbarer Produktionssysteme abhängig von der Entwicklung des Fertigungsprogramms aufbauend auf KOREN ET AL. (1999), BLUMENAU (2006) und KLUGE (2011)

Grundsätzlich dient die **stufenweise Anpassung** eines Produktionssystems an lebenszyklusorientierte Anforderungen dazu, möglichst nahe am optimalen Betriebspunkt produzieren zu können (vgl. Abschnitt 2.2.5). Dadurch sinkt zum einen die finanzielle Belastung (z. B. Kapitalbindung, Investitionsrisiko, Wiederverwendbarkeit) und zum anderen wird die Planungsqualität und Robustheit des Produktionssystems erhöht (SLAMA 2004, BLUMENAU 2006, KLUGE 2011). Eine Kernfrage stellt dabei die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvolle Anpassung des Automatisierungsgrades dar (SLAMA 2004, BLUMENAU 2006, KLUGE 2011, STÄHR 2020).

Zur **Dimensionierung** leistungsgerechter und zugleich kostengünstiger Fertigungseinrichtungen bezüglich Art und Anzahl eignet sich das prinzipielle Vorgehen (Abbildung 21) nach WIENDAHL (1972). Dabei erfolgt zunächst ein technischer (Abschnitt 2.3.3), danach ein kapazitätsbezogener (Abschnitt 2.3.4) und abschließend ein wirtschaftlicher (Abschnitt 2.3.5) Abgleich von Bedarfs- und Angebotsprofil. Das Bedarfsprofil ist dazu aus dem Fertigungsprogramm und entsprechender Bearbeitungsanforderungen der zu produzierenden Werkstücke abgeleitet und beinhaltet die verfahrensspezifischen Kapazitätsbedarfe je Zeiteinheit.

Demgegenüber enthält ein Angebotsprofil das verfügbare Kapazitätsangebot pro Zeiteinheit, basierend auf dem Fertigungsverfahren und dessen Eigenschaften. Als Planungsergebnis liegen somit relevante Fertigungseinrichtungen mit den davon abgeleiteten Personal- und Flächenbedarfen vor.

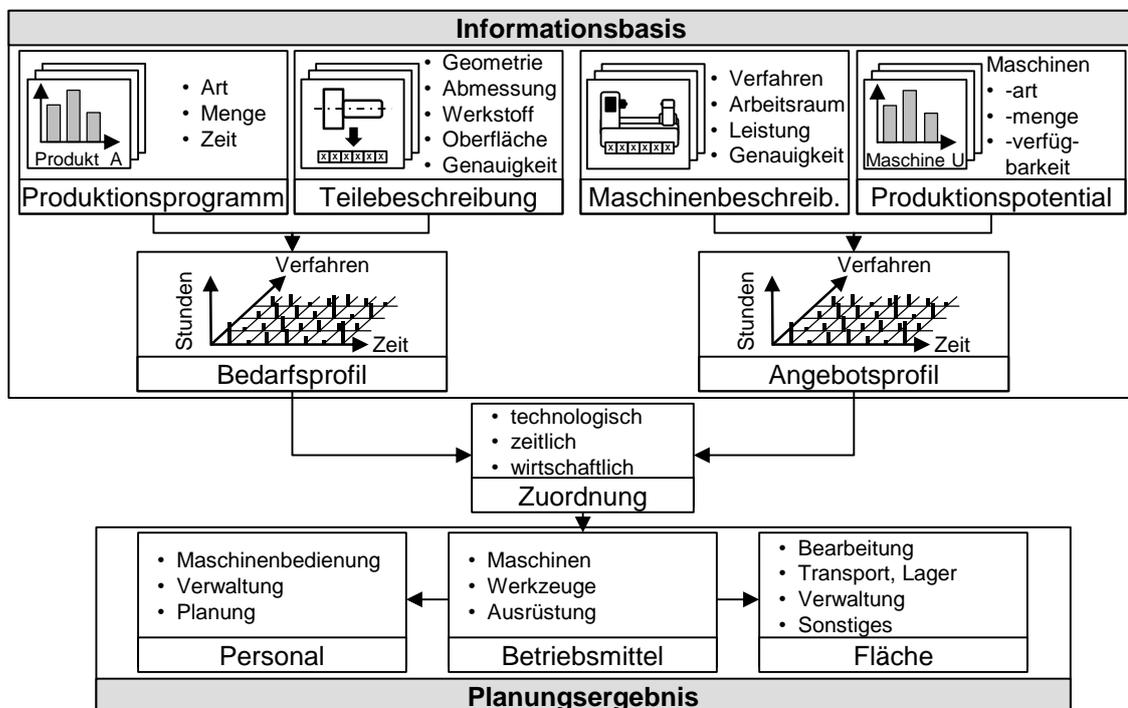


Abbildung 21: Systematik zur Dimensionierung von Ressourcen in Anlehnung an WIENDAHL (1972) und WIENDAHL ET AL. (2014)

2.3.3 Modellbasierte, technische Auslegung

Die technische Auslegung von Fertigungseinrichtungen hängt im Wesentlichen von den technologischen Bearbeitungsanforderungen des zu bearbeitenden Produktspektrums ab (vgl. Abschnitt 2.3.2). Hierzu bestimmt das Produktspektrum bzw. dessen Bearbeitungsanforderungen die für die Herstellung erforderlichen Prozesse, die wiederum von Ressourcen umgesetzt werden (vgl. Abschnitt 2.1.1). Entsprechende Fertigungseinrichtungen lassen sich nicht nur bezüglich des Automatisierungskonzepts (vgl. Abschnitt 2.2.1), sondern vor allem anhand des Fertigungsverfahrens und der Leistungsdaten unterscheiden (vgl. EVERSHEIM 1989). Für den technischen Abgleich (vgl. Abschnitt 2.3.2) eignet sich demnach das allgemeingültige **Produkt-Prozess-Ressource-Konzept** (PPR-Konzept), welches die Beziehungen der drei Domänen (Abbildung 22) abbildet.

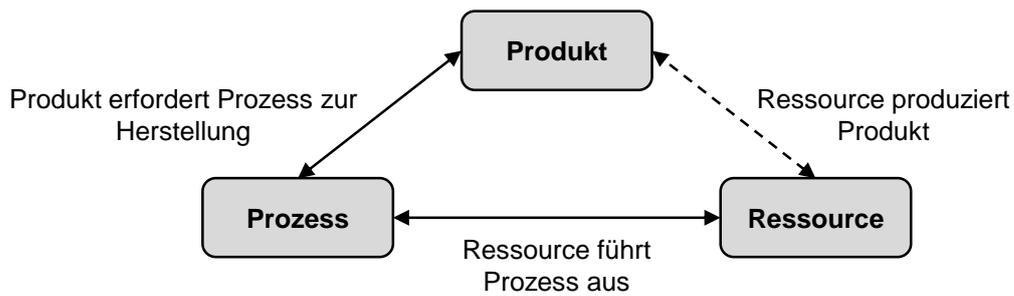


Abbildung 22: Relationen im PPR-Konzept in Anlehnung an DRATH & SCHLEIPEN (2010) und STANEV (2018)

Aufbauend auf diesem Grundprinzip sind im Kontext der Digitalen Fabrik Produkte, Prozesse und Ressourcen mit deren Abhängigkeiten in einem integrierten **PPR-Datenmodell** über Product-Lifecycle-Management-Systeme (PLM-Systeme) abbildbar (STEINWASSER 1996, DRATH & SCHLEIPEN 2010, DANGELMAIER ET AL. 2013). PLM-Systeme beinhalten Produktdatenmanagementsysteme (PDM-Systeme) und bilden die administrative und funktionale Basis zur Integration von unter anderem Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Engineering (CAE) und Computer Aided Manufacturing (CAM)-Systemen (EIGNER & STELZER 2009, MICHNIEWICZ 2019). Ein Standard zur generischen Deskription von PPR-Modellen ist allerdings im Detail nicht etabliert (DANGELMAIER ET AL. 2013). Ein gängiger Ansatz stellt jedoch die abstrakte Verknüpfung von Prozessen und Ressourcen anhand sogenannter Fähigkeiten, in Englisch „Skills“, dar (vgl. z. B. KLUGE 2011, MÜLLER ET AL. 2015, BACKHAUS 2016, MICHNIEWICZ 2019, SINNWELL 2020).

Unter **Fähigkeiten** wird in dieser Arbeit die abstrakte, lösungsneutrale und semantische Beschreibung von Prozessen verstanden, die zur Produktherstellung ausgeführt werden bzw. durch Ressourcen durchführbar sind (BACKHAUS 2016, BACKHAUS & REINHART 2017, MICHNIEWICZ 2019). Die Taxonomien von Fähigkeiten orientieren sich typischerweise an Normen (z. B. DIN 8580) und Richtlinien (z. B. VDI 2860) (vgl. z. B. KNOCH 2005, KLUGE 2011, HAMMERSTINGL & REINHART 2017). Anhand dieser standardisierten Beschreibungssystematiken lassen sich die prozessrelevanten Anforderungen eines Produktes mit den Fähigkeiten der Ressourcen abgleichen (KLUGE 2011, MÜLLER ET AL. 2015).

Für die dreidimensionale Modellierung von Produkten und Ressourcen sind CAD-Systeme weit verbreitet. Mit **Feature**-basierten CAD-Programmen werden dabei digitale Modelle erstellt, die über die geometrische Gestalt hinausgehende Informationen (z. B. Toleranzen, Rauigkeiten) mit Semantik enthalten (KNOCH 2005,

EHRENSPIEL ET AL. 2014). Ein Form-Feature als informationstechnisches Element stellt demnach eine Aggregation von Eigenschaften einer Ressource bzw. eines Produktes dar (WEBER 1996, VDI 2218).

Zur detaillierten Charakterisierung der Eigenschaften sind **Merkmale bzw. Parameter** verwendbar. Die Eigenschaften der zu fertigen Produkte (z. B. Maß- und Formtoleranzen, Werkstoffe) werden über Produktmerkmale ausgedrückt (vgl. z. B. FALLBÖHMER 2000, TROMMER 2001, KLUGE 2011). Dagegen beziehen sich Prozess- bzw. Ressourcenmerkmale auf bauteilspezifische und -neutrale Eigenschaften von Ressourcen (z. B. bearbeitbare Werkstoffe, Prozesszeiten, Emissionen) (vgl. z. B. TROMMER 2001, KLUGE 2011).

Für die Umsetzung der Wissensbasis der integrierten PPR-Modellen in produkt- und ressourcenbezogene Konfigurationszustände während des Lebenszykluses eignen sich zur **Konfigurationsmodellierung** sogenannte Konfigurationsmanagementsysteme. Diese Systeme beinhalten einen einheitlichen Satz an Regeln und Werkzeugen zur Generierung von modularen Konfigurationen und bestehen dazu aus einem Daten- und einem Konfigurationsmodell, die miteinander verbunden sind (RIITAHUHTA & PULKKINEN 2001, BONGULIELMI 2002, EIGNER 2014, ZEBOLD 2020). Das Konfigurationsmodell ermöglicht die im Konfigurationsprozess erforderliche Abbildung des Konfigurationswissens zur Erarbeitung von Konfigurationen und greift auf das im strukturierten Datenmodell vorhandene und einheitlich definierte Wissensvolumen zurück (vgl. z. B. BONGULIELMI 2002).

2.3.4 Kapazitätsbezogene Auslegung

Um die zu erwartende Ausbringungsmenge für eine Lebenszyklusphase zu erbringen, ist neben der technischen (vgl. Abschnitt 2.3.3) auch die kapazitätsbezogene Auslegung der Fertigungseinrichtungen erforderlich (vgl. Abschnitt 2.3.2). Mit der **Kapazitätsplanung** findet der dafür erforderliche Vergleich des Kapazitätsbedarfs (Bedarfsprofil) mit dem vorhandenen Kapazitätsangebot (Angebotsprofil) sowie deren Kapazitätsabstimmung statt, mit dem Ziel eine möglichst optimale Kapazitätsauslastung für den definierten Zeitraum zu erreichen (SCHUH ET AL. 2014, WIENDAHL & WIENDAHL 2020). Während der Kapazitätsbedarf die erforderliche Bearbeitungszeit für das Werkstückspektrum repräsentiert, umfasst das Kapazitätsangebot die verfügbare Einsatzzeit von Betriebsmitteln (SCHUH ET AL. 2014, GRUNDIG 2018, WIENDAHL & WIENDAHL 2020).

Die **Kapazitätsabstimmung** (Abbildung 23) zwischen Kapazitätsbedarf und -angebot kann nach SCHUH ET AL. (2012), SCHUH ET AL. (2014) und WIENDAHL & WIENDAHL (2020) generell anhand der Kapazitätsanpassung, der Belastungsanpassung oder dem Belastungsabgleich vorgenommen werden. Mithilfe der *Kapazitätsanpassung* lässt sich vor allem im lang- und mittelfristigen, aber auch im kurzfristigen Zeithorizont das verfügbare Kapazitätsangebot an den erforderlichen Kapazitätsbedarf angleichen, indem eine Anpassung hinsichtlich personeller (z. B. Personaleinstellungen) oder technischer (z. B. Veräußerung, Rekonfiguration von Anlagen) Aspekte erfolgt. Dagegen bewirkt die *Belastungsanpassung* eine eher mittelfristige Erhöhung bzw. Verminderung der Belastung (Kapazitätsbedarf) durch beispielsweise die Annahme oder Vergabe von Fremdaufträgen. Ferner dient der *Belastungsabgleich* zur vorwiegend kurzfristigen Veränderung des Belastungsprofils (Kapazitätsbedarf) durch zeitliches Verschieben (z. B. Losteilung) oder technisches Verlagern (z. B. Ausweichen auf andere Betriebsmittel) von Aufträgen.

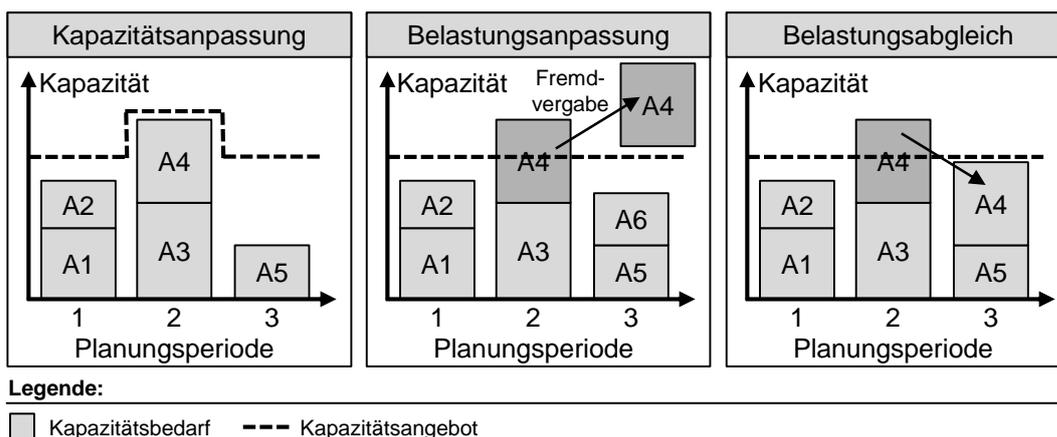


Abbildung 23: Möglichkeiten der Kapazitätsabstimmung in Anlehnung an SCHUH ET AL. (2012)

2.3.5 Kosten- und Leistungsbewertung

Bei der Planung alternativer Produktionssystemkonzepte ist, neben der technischen (vgl. Abschnitt 2.3.3) und kapazitätsbezogenen (vgl. Abschnitt 2.3.4) Auslegung, die wirtschaftliche Bewertung von Bedeutung (vgl. Abschnitt 2.3.2). Dabei wird grundsätzlich zwischen der Leistungs- und Kosten- bzw. Wirtschaftlichkeitsbewertung differenziert (PAWELLEK 2014, RUDTSCH 2016). Während letztere die Quantifizierung monetärer Größen umfasst, werden mit der Leistungsbewertung qualitative, nicht monetäre Kennwerte miteinander verglichen.

Die **Bewertung der Leistungsfähigkeit** von Produktionssystemen hängt im Wesentlichen von mehreren Kriterien, wie Durchlaufzeit, Auslastung, Qualität, Flexibilität, Wandlungsfähigkeit, etc. ab (vgl. z. B. EVERSHEIM 1989, HARTMANN 1992, PAWELLEK 2014, RUDTSCH 2016). Die Kriterien stehen aber zumeist in einem Konfliktverhältnis und sind schwierig gegeneinander zu bewerten (ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991). Ein geeigneter Ansatz, mit dem dennoch die beste Produktionssystemalternative unter Berücksichtigung aller nicht monetären Kriterien ausgewählt werden kann, stellt die multikriterielle Entscheidungsanalyse (vgl. z. B. ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991) dar. Als deren gängige Verfahren sind beispielhaft die Nutzwertanalyse (vgl. ZANGEMEISTER 2014) oder der Analytic Hierarchy Process (vgl. SAATY 1990, 2008) zu nennen.

Im Gegensatz dazu basiert die **Kosten- bzw. Wirtschaftlichkeitsbewertung** auf der Beurteilung der monetären Vorteilhaftigkeit von Konzeptalternativen als Investitionsobjekte. Eine Investition umfasst dabei einen Zahlungsstrom, der mit Auszahlungen startet sowie Ein- und Auszahlungen zu späteren Zeitpunkten vermuten lässt (GÖTZE 2014). Generell wird bei der Investitionsrechnung zwischen statischen und dynamischen Verfahren differenziert (vgl. GÖTZE 2014, PAWELLEK 2014). Während statische Verfahren (z. B. Kosten-, Rentabilitätsvergleichsrechnung) die gesamte Nutzungsdauer eines Investitionsobjekts lediglich mit einer hypothetischen Durchschnittsperiode berücksichtigen, erfolgt mit dynamischen Verfahren (z. B. Kapitalwert-, Annuitätsmethode) eine periodenspezifische Betrachtung (GÖTZE 2014, PAWELLEK 2014). Demnach sind, im Gegensatz zu dynamischen Verfahren, statische Ansätze für die Lebenszyklusbetrachtung von veränderungsfähigen Produktionssystemen nur bedingt geeignet.

Zur periodengerechten Zuordnung der zeitlich unterschiedlichen Zahlungsströme entlang des Lebenszyklus wird in der Praxis vor allem die **Lebenszykluskostenrechnung** eingesetzt (vgl. VDI 2884). Bei dieser eignet sich die Kapitalwertmethode (vgl. z. B. GÖTZE 2014), als Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung, zur Diskontierung der Zahlungsströme auf einen gemeinsamen Bezugszeitpunkt hinsichtlich eines Alternativenvergleichs (VDI 2884, DIN EN 60300-3-3). Im engen Zusammenhang damit erfolgt zur Beurteilung der Auswirkungen von Unsicherheiten in der Investitionsentscheidung die Anwendung der Sensitivitätsanalyse (vgl. z. B. GÖTZE 2014), bei der die zugrundeliegenden Eingangsparameter durch systematische Variation verifiziert werden (VDI 2884, DIN EN 60300-3-3).

Allerdings ermöglicht die Sensitivitätsanalyse keine flexible Zeitpunkt Betrachtung der Zahlungsströme für skalierbare Produktionssysteme mit unsicherer Ausbaustufenfolgeentwicklung (vgl. Abschnitt 2.3.2). Eine geeignete Lösung bietet aber deren spezielle Art des **szenariobasierten Kapitalwerts**. Dabei werden typischerweise wahrscheinliche, optimistische und pessimistische Szenarien mit gewichteten Eintrittswahrscheinlichkeiten gebildet und zu jedem Szenario ein expliziter Kapitalwert unter definierten Annahmen ermittelt (BAECKER ET AL. 2003, BONDUELLE ET AL. 2003, SUDHOFF 2008).

2.4 Fazit

Zur Etablierung eines einheitlichen Verständnisses wurden mit diesem Kapitel die relevanten Grundlagen hinsichtlich der Zielsetzung (vgl. Abschnitt 1.3) dieser Forschungsarbeit umrissen. Eingangs wurde dazu auf die wesentlichen Begrifflichkeiten zum Produktionssystem und deren Veränderungsfähigkeit eingegangen. Neben der Erläuterung der relevanten Grundzüge eines Produktionssystems erfolgte insbesondere die Abgrenzung der taktischen und operativen Veränderungstypen. Im Anschluss daran lag der Fokus auf den wesentlichen Bestandteilen und Eigenschaften eines Fertigungssystems im CPPS-Kontext, wobei unter anderem die Charakteristika rekonfigurierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen beschrieben wurden. Abschließend erfolgte die Darlegung relevanter Schritte bei der Produktionssystemplanung und die schwerpunktmäßige Betrachtung der Aufgaben für die lebenszyklusorientierte Planung modularer, skalierbarer Produktionssysteme. Im nachfolgenden Kapitel 3 wird zur vorgestellten Thematik der relevante Stand der Forschung beleuchtet.

3 Stand der Forschung

3.1 Planung veränderungsfähiger Produktionssysteme

Bei den relevanten Forschungsarbeiten zur Ableitung des Forschungsdefizits (Abschnitt 3.4) werden zunächst Arbeiten zur Planung veränderungsfähiger Produktionssysteme (Abschnitt 3.1) betrachtet, bevor auf die Ansätze zur CPPS-spezifischen Gestaltung von Produktionssystemen (Abschnitt 3.2) und zur Modellierung von Produktionssystemen bzw. deren Systemelemente (Abschnitt 3.3) eingegangen wird. In der wissenschaftlichen Literatur existiert eine Vielzahl von Ansätzen zu veränderungsfähigen Produktionssystemen. Ansätze, die sich in diesem Kontext fokussiert mit der Netzwerkstruktur (vgl. z. B. LÖFFLER 2011, MOSER 2014, 2018), der Fabrikstruktur (vgl. z. B. HERNÁNDEZ MORALES 2003, HILDEBRAND 2005, HAWER 2020), der Fließfertigung (vgl. z. B. KÜBER 2017, FISSEL 2019), der Bewertung (vgl. z. B. HEGER 2007, MÖLLER 2008, VELKOVA 2014) oder dem Rekonfigurationsprozess (vgl. z. B. CISEK 2005, KARL 2015, HEES 2017) auseinandersetzen, sind aufgrund der Zielstellung dieser Forschungsarbeit (vgl. Abschnitt 1.3) nicht Bestandteil der nachfolgenden Betrachtung. Vielmehr wird sich auf die Planung von Fertigungssystemen und -zellen (vgl. Abschnitt 2.1.1) in Hinblick auf ein strukturiertes Planungsvorgehen und die Rekonfiguration konzentriert. Dazu wird eingangs auf die Planung modularer, skalierbarer Produktionssysteme (Abschnitt 3.1.1) eingegangen, ehe weitere Ansätze zur Planung modularer Produktionssysteme (Abschnitt 3.1.2) ausgeführt werden.

3.1.1 Planung modularer, skalierbarer Produktionssysteme

Der Ansatz von SLAMA (2004) zeigt einen rechnergestützten Planungsansatz für modulare, skalierbare Montagesysteme. Das Ziel bei der Systemauslegung ist die stufenweise Anpassung von mitarbeiterorientierten bzw. hybriden Montagesystemen an veränderte Kapazitätsbedarfe entlang des Lebenszyklus. Dies ist durch einen hohen Grad an Wandlungsfähigkeit in der Anordnung und Gestaltung modular aufgebauter Arbeitsstationen realisiert, wobei insbesondere die Berücksichtigung des zukünftig höheren Automatisierungsgrades in den Arbeitsstationen eine zentrale Rolle spielt. Die Vorgehensweise zur Planung der skalierbaren Montagesystemalternativen startet mit einer Festlegung der Planungsziele und einer lebenszyklusorientierten Szenariobetrachtung des zu erwartenden Kapazitätsbedarfes. Anschließend findet eine Beschreibung und Zerlegung der Planungsaufgabe in einzelne Tätigkeiten mit Ausführungszeiten statt, bevor die ausbaustufenfähige

Planung von Layout und Stationen erfolgt. Die Systemalternativen werden abschließend monetär und nicht monetär bewertet, um eine Lösung auszuwählen.

Der Planungsansatz von BLUMENAU (2006) legt ebenso einen Fokus auf die Skalierbarkeit. Den Schwerpunkt stellt ein Verfahren zur kooperativen und systematischen Ableitung einer Skalierungsempfehlung für wandlungsfähige Produktionssysteme dar, mit dem Ziel eine geeignete Investitionsstrategie für den gesamten Lebenszyklus zu entwickeln. Ausgehend von den Projektprämissen, den Anforderungen an die Lebenszyklusphasen und der Bestimmung der Prozesskette erfolgt eine erste Grobplanung und Bewertung alternativer Fertigungskonzepte für eine Fertigungs- bzw. Montagelinie. Dem kreativitätsbasierten Planungsprozess liegt dazu ein Grundbaukasten für Fertigungskonzepte mit unterschiedlichen Automatisierungsstufen in den Bearbeitungsstationen zugrunde. Bei der anschließenden Gestaltung der wandlungsfähigen Produktionssysteme unterstützt, neben prinzipiellen Gestaltungsregeln, ein Regelkreis zur Herleitung einer Skalierung. Um dabei die Anforderungen der Lebenszyklusphase für die Investitionsstrategie bestmöglich zu erfüllen, werden aus dem Grundbaukasten ausgewählte Fertigungskonzepte zu Produktionssystemen kombiniert und diese abschließend kennzahlenbasiert bewertet.

In Ergänzung zu SLAMA (2004) präsentierte KLUGE (2011) eine Methodik zur fähigkeitsbasierten Grobplanung modularer Montagezellen mit Fokus auf der Skalierbarkeit. Wesentliche Grundlage bildet eine generische Beschreibungsmethode zur fähigkeitsbasierten Charakterisierung von Prozessen und Ressourcen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Das methodische Vorgehen beginnt mit der Definition der Planungsanforderungen und des szenariobasierten Stückzahlverlaufes entlang des Lebenszyklus. Anschließend findet nach einer Präzisierung von Kapazitätsbereichen die systematische, rechnergestützte Gestaltung entsprechender Zellkonfigurationen statt, um alternative Konfigurationen zu erhalten, die sich entsprechend den Lebenszyklusszenarien in Ausbaustufenfolgen überführen lassen. Bei der Gestaltung einer Zellkonfiguration werden zunächst Fähigkeitsfolgen erstellt und den Fähigkeiten geeignete Ressourcen aus einer Ressourcenbibliothek zugeordnet, bevor die kapazitätsbezogene Leistungsabstimmung und die Groblayoutplanung erfolgen. Abschließend findet für vorausgewählte Ausbaustufenfolgen eine szenariobasierte Bewertung statt, mit dem Ziel die geeignete Initialkonfiguration eines lebenszyklusbasierten Ausbaustufenkonzeptes zu bestimmen.

Die Arbeiten von WANG & KOREN (2012, 2013) legen einen systematischen Skalierungsansatz für rekonfigurierbare Fertigungssysteme dar. Es ermöglicht die Kapazitätsanpassung einer Systemkonfiguration entsprechend zukünftig veränderter Marktnachfrageanforderungen, indem deren wirtschaftlichste Rekonfiguration durch das Hinzufügen oder Entfernen von Anlagen identifiziert wird. Ein genetischer Algorithmus dient dabei zur Ermittlung des kostengerechten Lösungskonzepts abhängig von verschiedenen Randbedingungen.

Das Planungsverfahren von EILERS (2015) befasst sich mit der Skalierung und Rekonfiguration modularer Montagesysteme. Es ist in einen Ordnungsrahmen eingeordnet und weißt in vier Planungsphasen Methodenschritte zur Umsetzung wandlungsfähiger Lösungen auf. Ausgehend von einer szenariobasierten Bestimmung der erforderlichen Wandlungsfähigkeit für Produkt-, Stückzahl- oder Technologieveränderungen werden im zweiten Schritt Montagekonzepte grob geplant. Die dabei stattfindende Ermittlung von Montagestruktur und alternativer Wandlungskonzepte unterstützt ein hierarchisches Referenzmodell mit Lösungsansätzen zur Skalierung auf System- und Zellebene bzw. Rekonfiguration auf Station- und Stationsmodulebene. Bei der Planung von Ausbaustufenkonzepten werden zunächst Ausbaustufen anhand der Stückzahlenszenarien abgeleitet. Anschließend werden grundlegende Systemkonzepte zu jeder Ausbaustufe konzipiert und deren Migration von einer in die nächste Stufe anhand definierter Skalierungsmechanismen konzipiert. Die entsprechende Entwicklung der Rekonfigurationskonzepte beruht auf einem aus der Softwaretechnik abgeleiteten Ansatz, mit dem anhand eines Prozessmodells festgelegte Rekonfigurationsmechanismen im System implementiert und analysiert werden. Nach erfolgter Grobplanung werden im Zuge der Systemplanung ausgewählte Konzepte detailliert geplant, bewertet und die präferierte Lösung der Feinplanung übergeben.

Die Arbeit von BENKAMOUN (2016) beschreibt einen Ansatz zum Design und Management wandlungsfähiger Fertigungs- und Montagesysteme. Wesentliche Grundlage bildet eine systemtheoretische Formalisierung der Wandlungsfähigkeit in einem Architekturmodell, um die Anforderungen und strukturellen Komponenten bezüglich eines Systems abzubilden. Die eigentliche Vorgehensweise ist unter Berücksichtigung des szenariobasierten Lebenszyklus für das wandlungsfähige Produktionssystem in drei Prozessabläufe unterteilt, wobei die beiden letzteren komplementär stattfinden. Im ersten Prozess erfolgt die Modellierung des Produktionssystems und dessen Konfigurationsalternativen entlang des Lebenszyklus. Im zweiten Prozess werden infolge neuer Anforderungen für ein bestehendes System-

design Rekonfigurationen szenariobasiert vorgeplant, um die gegenwärtige Wandlungsfähigkeit zu prüfen und eine Reduzierung der Rekonfigurationskosten zu erreichen. Ferner befähigt der dritte Prozess zur Entwicklung geeigneter Rekonfigurationsmaßnahmen für ein neues Systemdesign.

Der Ansatz von STÄHR (2020) dient zur Planung und Konfigurationsauswahl modularer, skalierbarer Montagesysteme, wobei dies unter Ermittlung des geeigneten Grades an Wandlungsfähigkeit und der zur Umsetzung erforderlichen technischen Maßnahmen erfolgt. Ausgangspunkt der Planungsmethode stellt eine szenario- und kennzahlenbasierte Quantifizierung der Volatilität und Unsicherheit von Wandlungstreibern über den Lebenszyklus dar. Darauf basierend wird im Zuge der Grobplanung ein technischer Lösungsraum zu möglichen Montagekonfigurationen aufgespannt und die kostengünstigste Lösung (Skalierungsstrategie) mittels eines Markovschen Entscheidungsproblems abgeleitet. Wesentliche Grundlage hierzu bilden die auf EILERS (2015) aufbauenden Skalierungsmechanismen sowie eine Punktbewertung von Automatisierungsnutzen und -hemmnissen für jede Kombination automatisierter Module in einer Initialkonfiguration. Abschließend erfolgt in der Feinplanung eine Analyse der Skalierungsstrategie hinsichtlich der zu erwartenden Wandlungen, um damit eine gezielte Ableitung von Konstruktionsrichtlinien für die detaillierte Gestaltung der Anlagenkonzepte vorzunehmen. Die Basis für den Katalog an Konstruktionsrichtlinien bilden definierte Wandlungsbefähiger zweiter Ordnung nach PACHOW-FRAUENHOFER (2012).

3.1.2 Weitere Planungsansätze

Einen Ansatz zur Gestaltung modularer Produktionssysteme in der variantenreichen Serienproduktion zeigt die Arbeit von NEUHAUSEN (2001). Die Planungsschritte unterteilen sich in die Ist-Varianzanalyse sowie Grob- und Detailgestaltung und fügen sich in eine generelle Vorgehensweise zur integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung ein. Als zentrale Basis zur Gestaltung modularer Produktionssysteme fungieren sowohl Modelle für Produktprogramm, Produktstruktur, Produktionssystem und Produktionskosten als auch Gestaltungsmaßnahmen für Produktionslinien, -stationen, -prozesse und Produktkomponenten, mit denen sich die Varianz von Kundenanforderungen berücksichtigen lässt. Zu Beginn des Vorgehens erfolgt mit der Ist-Varianzanalyse die Untersuchung variantenbezogener Informationen ausgehend vom Produkt auf die Produktion. In der nachgelagerten Konzeptphase wird zur Grobgestaltung eines modularen Produktionssystems auf die Gestaltungsmaßnahmen für Produktionslinien zurückgegriffen

und der Einfluss der Produktmerkmalsvarianz verdeutlicht. Anschließend unterstützt in der Systemdesignphase die Detailgestaltung mit den weiteren Gestaltungsmaßnahmen bei der Entwicklung von Produktstrukturen und Produktionskonzepten.

Einen Ansatz zur rechnergestützten Gestaltung modularer Montagesysteme präsentiert LOFERER (2002). Den zentralen Bestandteil des Ansatzes stellt ein PPR-Modell mit fähigkeitsbasierter Beschreibung der elementaren Montageoperationen dar (vgl. Abschnitt 3.3.1). Darauf basierend wird eine Montageaufgabe in dessen Elementaroperationen zerlegt und diesen Operationen geeignete Montagekomponenten zugeordnet, die zu Montagemodulen eines automatisierten Montagesystems kombiniert werden, um ein Layout zu erstellen.

DRABOW (2006) präsentierte einen in die Produktionssystemplanung integrierbaren Modularisierungs- und Bewertungsansatz zur Gestaltung wandlungsfähiger Fertigungssysteme. Der ganzheitlichen Modularisierung liegt dazu ein hierarchisches Systemmodell mit den Partialmodellen Struktur und Ressource zugrunde. Das Strukturmodell definiert die organisatorische Grobstruktur des Fertigungssystems mittels Modulplattformen, welche die Anforderungen an die Wandlungsfähigkeit darlegen, und die physische Feinstruktur anhand von Produktionsmodulen, die die anforderungsgerechte Konfiguration des Fertigungssystems determinieren. Die den Produktionsmodulen zuordenbaren Betriebsmittel sind im Ressourcenmodell abgebildet und enthalten Gestaltungsrichtlinien für deren modular, rekonfigurierbaren Aufbau. Ferner dient die kriterienbasierte Bewertung zur Quantifizierung der Wandlungsfähigkeit eines Fertigungssystems, um potenzielle Defizite bezüglich der Rekonfiguration zu identifizieren.

Die Arbeit von PACHOW-FRAUENHOFER (2012) handelt von der Planung veränderungsfähiger Montagesysteme unter Berücksichtigung des wirtschaftlich optimalen Grades an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. Als zentrale Basis dient ein generisches Modell, das den Veränderungsprozess mittels eines Regelkreises abbildet und die systematische Planung von Wandlungsbefähigern unterstützt. Das Planungsvorgehen gliedert sich in die Phasen Zieldefinition, Analyse, Vorbewertung, Gestaltung und Bewertung. Ausgehend von der Definition der Ziele und Veränderungsstrategie werden in der Analysephase die Wandlungstreiber und deren Ausmaß auf die Elemente des Montagesystems ermittelt. Nach erster Vorbewertung des Veränderungsfähigkeitsbedarfes und des Verhältnisses von Flexibilität

und Wandlungsfähigkeit erfolgt die Gestaltung des Montagesystems unter Auswahl geeigneter Wandlungsbefähiger zweiter Ordnung. Die finale Bewertung der Konzeptalternativen unterliegt einer lebenszyklusbasierten Kapitalwertmethode.

Ähnlich wie NEUHAUSEN (2001) zeigte LANDHERR (2014) einen modellgestützten Ansatz zur integrierten Produkt- und Montagesystemkonfiguration. Im Fokus steht die zielgerichtete Rekonfiguration auf Basis der Ableitung geeigneter Adaptionsmaßnahmen für auftretende Änderungsbedarfe. Zentrale Basis zur abgestimmten Adaption von Produkt und Montagesystem bildet deren modulare, funktional verknüpfte und hierarchische Abbildung in einem digitalen Modell, das zur Zustandsabbildung eine regelkreisbasierte Verknüpfung zum realen System aufweist. Die eigentliche Vorgehensweise unterteilt sich in drei Phasen. Ausgehend von einer permanenten Überwachung struktureller, montage- und produktseitiger Änderungsbedarfe mittels eines Konfigurationskalenders erfolgt im zweiten Schritt die virtuelle Produkt- und Montagekonfiguration basierend auf dem digitalen Modell. Dabei werden zunächst konfigurationsspezifische Maßnahmen hinsichtlich der Änderungsbedarfe ausgewählt und deren Auswirkungen identifiziert, bevor die Planung alternativer Systemkonfigurationen stattfindet. Abschließend werden die Konfigurationen anhand ihrer Effizienz, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit mittels paarweisen Vergleich bewertet und eine geeignete ausgewählt.

In Ergänzung zu LANDHERR (2014) befasst sich die Arbeit von NEUMANN (2015) mit der Auswahl geeigneter Adaptionen. Im Fokus stehen jedoch kurzfristige Adaptionen am Montagesystem infolge eines suboptimalen Betriebes bei einem Zeithorizont von einer Schicht bis hin zu einem Monat. Der Methode liegt dazu ein regelbasiertes System zum situationsspezifischen Auslösen des Adaptionsprozesses aufgrund kurzfristiger Änderungen von Auftragszusammensetzung und Produktvarianten sowie technischer Störungen und Technologieveränderungen an Betriebsmitteln im Vergleich zur Normalplanung des Systems zugrunde. Die softwaregestützte Methode ist in fünf Phasen unterteilt. Auf Grundlage der Abbildung des Montagesystems in einem Strukturmodell erfolgt im zweiten Schritt die Identifikation der Abweichungen und Ableitung technischer, organisatorischer und struktureller Handlungsmaßnahmen. Anschließend werden situationsspezifische Anpassungskonzepte mithilfe des Modells entwickelt und die Konzeptalternativen qualitativ und quantitativ bewertet, bevor das optimale Konzept umgesetzt wird.

Ähnlich wie NEUHAUSEN (2001) und LANDHERR (2014) fokussiert sich die Arbeit von SAUER (2017) auf die integrierte Produkt- und Montagekonfiguration. Am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge wird dabei eine Methode zur

qualitätsorientierten Konfiguration von Montagelinien für unreife Produkttechnologien aufgezeigt. Die automatische Generierung der Konfigurationsalternativen fußt dazu auf einer grundlegenden Modellierung möglicher Produkt-, Montageprozess- und Qualitätsmerkmale. Die Alternativen werden anschließend zur Auswahl einer geeigneten Qualitätssicherungsstrategie simulationsgestützt untersucht, bevor eine multikriterielle Bewertung für die finale Entscheidungsfindung erfolgt. Insbesondere die Bewertung der Gesamtanlageneffektivität und Wandlungsfähigkeit spielt dabei eine zentrale Rolle.

HÖRAUF (2019) entwickelte einen softwaregestützten Ansatz zur Planung und Rekonfiguration CPPS-basierter Montagesysteme mit durchgängiger Informationsnutzung. Zentrale Basis bildet ein fähigkeitsbasiertes Datenmodell (vgl. Abschnitt 3.3.1) zur Beschreibung der Produkte, Montageprozesse und Betriebsmittel von Montagesystemen. Die darauf aufbauende Planungsmethode orientiert sich an den allgemeinen Planungsphasen der Montagesystemplanung und ergänzt diese, ausgehend von der Grobplanung bis zum Betrieb des Montagesystems. Im Zuge der Grobplanung findet, basierend auf einer Definition der Montageanforderungen für neue bzw. geänderte Produkte und Prozesse, eine fähigkeitsbasierte Herleitung der Montagevorranggraphen statt. Auf Basis der Graphen wird in der Feinplanungsphase eine taktbezogene Einplanung der Montageoperationen und fähigkeitsbasierte Auswahl geeigneter Montagemodule für die Systemkonfiguration vorgenommen, wobei deren Konfigurationsalternativen simulationsgestützt bewertet und optimiert werden. Anschließend erfolgt in der Realisierungsphase, basierend auf dem Systemkonfigurationszustand, die Konfiguration der agentenbasierten Anlagensteuerungstechnik (vgl. Abschnitt 3.2.2). Abschließend werden für den Systemanlauf die getakteten Montagereihenfolgen in den Montagebetrieb überführt und Rekonfigurationen am Montagesystem kontinuierlich erfasst und in die Planungsumgebung zurückgespielt.

3.1.3 Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Forschungsansätze zentrale Fragen zur *Grobplanung modularer Fertigungszellen* aufgreifen. Neben einer antizipativen *Lebenszyklusbetrachtung* mit Veränderungstreibern werden auch *Skalierungsmaßnahmen* für die Planung von Ausbaustufenkonzepten dargelegt (vgl. EILERS 2015, STÄHR 2020). Die Forschungsarbeiten von SLAMA (2004), BLUMENAU (2006), KLUGE (2011) und STÄHR (2020) setzen sich dabei fokussiert mit unterschiedlichen *Automatisierungsstufen* auseinander, gehen jedoch nicht auf die im CPPS-Kontext signifikante Informationsautomatisierung ein. Für die Re- bzw.

Konfiguration werden darüber hinaus differente Ansätze für den *anforderungsbezogenen Eignungsabgleich* vorgestellt, worunter auch der fähigkeitsbasierte PPR-Abgleich (vgl. LOFERER 2002, KLUGE 2011, HÖRAUF 2019) fällt. Ebenso erfolgt eine *Kosten- und Leistungsbewertung*, wobei vereinzelt der Lebenszyklus (vgl. KLUGE 2011, PACHOW-FRAUENHOFER 2012, STÄHR 2020) berücksichtigt ist. Über alle Arbeiten (vgl. Bewertungsübersicht in Abschnitt 3.4) hinweg, finden *steuerungsrelevante CPPS-Spezifika* jedoch keine nennenswerte Beachtung in der Grobplanung. Lediglich die Arbeit von HÖRAUF (2019) befasst sich mit jenen Spezifika in der Feinplanungsphase.

3.2 CPPS-spezifische Gestaltung von Produktionssystemen

In diesem Abschnitt werden Ansätze zur CPPS-spezifischen Gestaltung von Produktionssystemen betrachtet, die sich auf die steuerungsrelevanten Eigenschaften von CPPS konzentrieren. Mit der Planung von Produktionssystemen einschließlich deren Automatisierungsgrades haben sich vor allem in den 1970er bis 1990er Jahren zahlreiche Arbeiten beschäftigt (vgl. z. B. BEHRENDT 2009, SEIFERMANN 2017). Dabei gehen insbesondere die Ansätze von WESTKÄMPER (1977) und BUBMANN (1983) auf den stufenweisen Ausbau automatisierter Fertigungssysteme ein. Die Arbeiten berücksichtigen aber weder den für CPPS relevanten modularen Aufbau noch die automatisierte Informationsverarbeitung. Im Nachfolgenden werden CPPS-relevante Forschungsarbeiten aus der Produktionssystemplanung (Abschnitt 3.2.1) sowie aus weiteren Themenbereichen (Abschnitt 3.2.2) beleuchtet.

3.2.1 CPPS-spezifische Produktionssystemplanung

DEINDL (2013) befasste sich mit der anforderungsgerechten Gestaltung intelligenter Objekte abhängig von der Steuerungsstruktur eines CPPS. Eine zentrale Grundlage des Feinplanungsansatzes stellt die Beschreibung von intelligenten Objekten mithilfe eines morphologischen Kastens dar, der anwendungs-, objekt- und systembezogene Merkmale mit deren Ausprägungen beinhaltet. Anhand einer kombinierten Merkmalsauswahl sind damit die relevanten Anforderungen an die Gestaltung eines Objektes für CPPS-spezifische Anwendungen definierbar. Darauf aufbauend lassen sich mit Hilfe von Lösungsprinzipien intelligente Objekte unter Berücksichtigung des Intelligenz- bzw. Informationsverarbeitungsgrades im System entwerfen. Die für ein Lösungsprinzip erforderliche Kombination an prinzi-

piellen Lösungselementen auf System- und Objektebene beruht auf einem weiteren morphologischen Kasten, der in ein Modell mit Verknüpfungsregeln eingebunden ist.

Ebenfalls im Rahmen der Feinplanung befasste sich WESTERMANN (2017) mit der Gestaltung von Fertigungseinrichtungen im CPPS-Kontext. Der Ansatz fokussiert sich auf die reifegradbasierte Entwicklung technischer Anlagen hin zu vernetzten Teilsystemen eines CPPS anhand von fünf Leistungsstufen. Zentrales Fundament des Ansatzes bildet, neben einer Referenzarchitektur für CPPS, ein Reifegradmodell, das die systematische Leistungsbewertung und -steigerung der Anlagen ermöglicht. Der Leistungsbewertung liegt ein morphologischer Kasten zugrunde, der die Leistungsstufen des CPPS beinhaltet und den Zusammenhang zwischen CPS-Komponenten mit der Anlagenebene darstellt. Abhängig von der Leistungsstufe sind dazu im morphologischen Kasten die minimalen Ausprägungen jeder CPS-Komponente definiert. Somit kann der Planer die Anlagen hinsichtlich der Anforderungen an die jeweilige Leistungsstufe im System weiterentwickeln.

Die Arbeiten von SINNWELL ET AL. (2017) und CADET ET AL. (2017) zeigen einen modellbasierten Ansatz zur integrierten Planung von Produkten und Produktionssystemen im CPPS-Kontext, wobei auf die Gestaltung und Bewertung der Steuerungslogik im Rahmen der Grobplanung eingegangen wird. Dazu werden anhand von Zielen und Randbedingungen geeignete Steuerungsmechanismen für Produktionsstrukturalternativen ausgewählt, diese mittels Verhaltensdiagrammen spezifiziert und in eine agentenbasierte Simulationsumgebung implementiert. Alternative Struktur- und Steuerungskonzepte sind somit für eine finale Entscheidungsfindung im Simulationsmodell mithilfe der Zielgrößen bewertbar (vgl. FISCHER ET AL. 2017). Weiterhin wird ein Vorgehen zur technischen Planung von Objektgedächtnis und Kommunikationsarchitektur für spätere Planungsphasen aufgezeigt.

Ebenso im Kontext der integrierten Produkt- und Produktionssystemplanung befasst sich die Arbeit von KÖCHLING (2018) mit der Gestaltung des autonomen Steuerungsverhaltens für selbstoptimierende Produktionssysteme abhängig von Zielgrößen. Im Mittelpunkt des Ansatzes steht ein Verhaltensmodell zur Modellierung des Verhaltens in der Fertigungssteuerung. Es beinhaltet die gesamten steuerungsrelevanten Ablaufprozesse des Produktionssystems, die um verhaltensrelevante Funktionen der Selbstoptimierung erweiterbar sind. Das Verhaltensmodell bildet zudem die Grundlage zur Verhaltensabbildung in Form von Steuerungs-

methoden in einer Materialflusssimulation. Durch Simulation kann somit das Systemverhalten abgesichert und der entsprechende Selbststeuerungs- bzw. Autonomiegrad bezüglich der Zielerfüllung festgelegt werden.

Der Ansatz von SCHOLER (2018) behandelt im Zuge der Feinplanung den Systementwurf und die Realisierung hybrider Montagestationen, bei der die Rekonfiguration und angepasste Automatisierung durch CPPS-fähige Ressourcen im Fokus steht. Die Erarbeitung eines CPPS-basierten Konfigurationskonzepts als konstruktiver Anlagenentwurf beruht auf der Kombination von Modulen, die den durchzuführenden Prozessen einer ablaufbasierten und in der Anlagensteuerung lesbaren Arbeitsanweisung (Worklist) zugeordnet sind. Den Modulen liegt dazu ein auf einer einheitlichen Beschreibungssystematik basierender Datensatz mit physischen und steuerungstechnischen Eigenschaften sowie ein Baukasten mit definierten Modulklassen (z. B. Robotersystem, Sensor, HMI usw.) zugrunde. Die praktische Umsetzung der Konfiguration erfolgt über ein Integrationskonzept. Dabei wird, neben dem physischen Anlagenaufbau, die steuerungstechnische Umsetzung durch Übertragung der Datensätze und Worklist vollzogen.

Die Arbeit von HÖRAUF (2019) befasst sich mit der Planung eines CPPS-basierten Montagesystems (vgl. Abschnitt 3.1.2) und fokussiert sich in der Realisierungsphase auf die Konfiguration der agentenbasierten Anlagensteuerungstechnik. Im Steuerungssystem dienen eingetaktete Montagereihenfolgen der Produktvarianten als digitales Montagegedächtnis, mit denen die produktorientierte Ansteuerung und Parameterkonfiguration von Montagemodulen in jeder Montagestation ermöglicht werden. Um die Ausführung der agentenbasierten Steuerungscode in den Montagemodulen zu gewährleisten, werden die Schnittstellen zur Ansteuerung und Übertragung der notwendigen Produktinformationen mittels einer modulabhängigen Syntax und Semantik im Steuerungssystem spezifiziert. Anschließend wird mit dem Montagesystemanlauf in der nächsten Planungsphase gestartet.

Für die Grobplanung eines hochautomatisierten Produktionssystems schlagen KIEFER ET AL. (2019) und KIEFER (2020) einen Ansatz zur integrativen Gestaltung eines merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystems vor. Das Fundament des entwickelten Steuerungssystems stellt eine direkte Identifikation von Produkten dar, bei der Sensoren in Handhabungssystemen genutzt werden, um den Objekttyp von Produkten anhand ihrer Merkmale zu erkennen. Die Konfiguration des Steuerungssystems in einer Ablaufsimulation ermöglicht darüber hinaus die Bewertung, ob im Rahmen einer Neuplanung die direkte, merkmalsbasierte gegenüber der indirekten, ID-basierten Identifikation wirtschaftlich zu bevorzugen ist.

3.2.2 Weitere CPPS-spezifische Ansätze

Aufbauend auf Automatisierungstaxonomien entwickelte FROHM (2008) ein zweidimensionales Schema zur Klassifizierung der Automatisierungsstufen von Maschinen bzw. Arbeitsstationen, bei der das autonome Steuerungsverhalten berücksichtigt ist. Das Schema differenziert zwischen mechanisierter und kognitiver Dimension und weist jeweils sieben Automatisierungsstufen, ausgehend von vollständig manuell bis vollständig automatisiert, aus. Dadurch kann das vorhandene und potenzielle Automatisierungslevel mit minimaler und maximaler Automatisierungsstufe je Dimension determiniert werden.

Ein ganzheitliches Evaluierungssystem zur Bestimmung des angemessenen Autonomie- bzw. Selbststeuerungsgrades für Logistikprozesse im Produktionssystem präsentierte eine Forschergruppe um Windt (vgl. WINDT 2008, WINDT ET AL. 2010, BÖSE 2012, PHILIPP 2014). Es ermöglicht den Vergleich von selbststeuernden mit fremdgesteuerten Prozessen bzw. eine Beurteilung alternativer Selbststeuerungsansätze. Grundannahme des Ansatzes ist, dass einer hohen Komplexität im Materialfluss durch Selbststeuerung begegnet wird. Der Ansatz eruiert dazu das Potenzial des Selbststeuerungsgrades abhängig von logistischen Zielgrößen sowie vorhandenem Komplexitäts- und Selbststeuerungsgrad. Zur Ermittlung des Selbststeuerungsgrades unterstützt ein morphologischer Kriterienkatalog, mit dem gewichtete Selbststeuerungsmerkmale in den Kategorien Entscheidungsfindung, Informationsverarbeitung und Entscheidungsausführung entsprechend deren Ausprägungen bewertet werden. Der Komplexitätsgrad wird dagegen anhand eines Komplexitätsvektors bestimmt. Relevante Komplexitätsmerkmale sind dazu in die organisatorische, zeitliche oder systemische Komplexitätsart mithilfe eines Komplexitätswürfels eingeordnet. Die abschließende Bewertung zur Erreichung der logistischen Ziele abhängig vom Selbststeuerungsgrad erfolgt anhand eines regeltechnischen Ansatzes mit drei Bewertungsschritten und Simulationsstudien.

Ein realoptionsbasiertes Modell zur Bewertung der Flexibilitätseffekte selbststeuernder, logistischer Systeme präsentierte WYCISK (2009). Dabei wird der kausale Zusammenhang zwischen Selbststeuerungsgrad, Flexibilität und Unternehmenswert dargelegt. Die Bestimmung des Selbststeuerungsgrades beruht auf dem Kriterienkatalog von WINDT (2008). Der Nutzen des Selbststeuerungsgrades ist anhand eines Flexibilitätsgrades mit qualitativen, quantitativen, zeitlichen und räumlichen Merkmalausprägungen repräsentiert und steht den verursachten Flexibilitätskosten in einem unternehmenswertorientierten Realoptionsansatz gegenüber.

Anhand aufgestellter Hypothesen kann somit der ökonomische Nutzen von Flexibilitätseffekten durch Selbststeuerung bestimmt und deren Beitrag zum Unternehmenswert bemessen werden.

Im Hinblick auf die simulationsgestützte Leistungsbewertung von Produktionsobjekten im CPPS erweiterten THEUER (2012) und LASS ET AL. (2013) das Wertstromdesign zur Abbildung teil- bzw. autonomer Prozesse. Zentrales Element ist ein in Anlehnung an den Lean-Index der schlanken Produktion entwickelter Autonomie-Index, der die deskriptive Ermittlung des Autonomiegrades im Vergleich zum Wertstrom ermöglicht. Der Index berechnet sich aus dem Datenaustausch im Steuerungssystem und setzt dazu den Anteil autonomer Aktivitäten in Relation zur Gesamtzahl aller Aktivitäten. Das erweiterte Wertstromdesign bietet damit eine Modellierungsgrundlage für Simulationsstudien, um die Leistungsfähigkeit von CPPS mit unterschiedlichen Autonomiegraden, abhängig von Komplexität und logistischen Zielgrößen, in einer hybriden Simulationsumgebung mit physischen Demonstrator zu bewerten (vgl. LASS 2017).

Ebenfalls im Kontext dieser hybriden Simulationsumgebung entwickelten GRONAU ET AL. (2016) und GRUM ET AL. (2016) ein marktbasierendes Konzept zur simulationsgestützten Ermittlung des geeigneten Autonomiegrades für CPPS. Der Ansatz beruht auf der Bestimmung des Schnittpunktes der Nachfragekurve eines intelligenten Produktionsobjektes mit der Angebotskurve von dessen CPPS-Umgebung. Dazu werden anhand von Anforderungen und Annahmen der cyber-physische Markt modelliert und qualitative Hypothesen aufgestellt, die mittels der hybriden Simulationsumgebung überprüft werden.

Weiterhin beschäftigen sich die Arbeiten von GRONAU (2016, 2018, 2019) mit der Bestimmung des angemessenen Autonomiegrades im CPPS mithilfe einer marktbasierenden Autonomiematrix. Konkret wird damit anhand eines Vergleichs des geforderten Maßes an Autonomie (Nachfrage) und dem vorhandenen Autonomiegrad (Angebot) der Handlungsbedarf für Autonomieerhöhungen determiniert. Die Ermittlung der benötigten Autonomie erfolgt durch ein kriterienbasiertes Bewertungsschema mit Ausprägungen zu den typischen Eigenschaften von Produktionssystemen. Zur Messung des Autonomieangebots wird auf den marktbasierenden Ansatz von WINDT (2008) oder GRONAU ET AL. (2016) sowie den deskriptiven Autonomie-Index von THEUER (2012) verwiesen.

WINKLER ET AL. (2017) befassten sich mit der Effizienzbewertung von Produktionssystemen im Industrie 4.0-Kontext. Zentrale Grundlagen stellen dabei eine anlagenwirtschaftliche und produktionslogistische Effizienzkennzahl dar. Beide

Kennzahlen basieren auf der Gesamtanlageneffektivität, in Englisch Overall Equipment Efficiency (OEE), und werden über Gewichtungsfaktoren zur Bestimmung der Gesamteffizienz des Produktionssystems addiert. Erweitert um den Einsatz einer Materialflusssimulation und eines Datenerfassungskonzepts in der realen Produktion, wird damit eine laufende und echtzeitfähige Effizienzbewertung im Produktionssystems ermöglicht.

GRUNDSTEIN (2017) erweiterte das Evaluierungssystem von WINDT (2008) bezüglich der Bewertung der Selbststeuerung in einem gekoppelten Produktionsplanungs- und -steuerungssystem. Dazu wird der morphologische Kriterienkatalog zur Ermittlung des Selbststeuerungsgrades um Kriterien zur Kopplung von Produktionsplanungs- und -steuerungsprozesse ergänzt und der Komplexitätswürfel in einen morphologischen Kasten transformiert, der Komplexitätskriterien abhängig vom statischen und dynamischen Einfluss beinhaltet. Weiterhin ist die Bestimmung der logistischen Zielgrößenreichung um einen Produktionsplanerfüllungsgrad angepasst.

Der Ansatz von BAUER ET AL. (2019) schlägt für die stufenweise Entwicklung einer autonomen Fabrik ein Reifegradmodell vor. Auf Fabrikebene sind dazu fünf Autonomiestufen, ausgehend von der analogen, über die flexible bis hin zur autonomen Fabrik, definiert. Die Anforderungen an jede Stufe charakterisiert eine Kombination von Merkmalsausprägungen in einem morphologischen Kasten. Mehrere Merkmale sind hierfür mit bis zu fünf Reifegradausprägungen in den Kategorien Produktionszellen, Material- und Informationsfluss, Entwicklungsstufen von Einheiten, Rolle der Werker sowie Fabrikorganisation eingeordnet.

In Ergänzung dazu zeigt die Arbeit von STYR ET AL. (2020) ein Beschreibungsmodell zur Bestimmung des Autonomielevels von der Prozess- bis zur Fabrikebene. Abhängig vom abnehmenden Grad des menschlichen Eingriffs sind vier Autonomiestufen anhand der Kombination von Merkmalsausprägungen in einem morphologischen Kasten charakterisiert. Die Merkmale repräsentieren dabei die erforderlichen Ausprägungen der Vernetzung, des Selbstlernens, der Vorhersagbarkeit, des Arbeitspensums sowie der ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit zu jeder Autonomiestufe.

3.2.3 Fazit

Bei Betrachtung der vorgestellten Ansätze ist festzuhalten, dass verschiedene Aspekte im CPPS-Kontext dargelegt werden. Fokussiert mit *CPPS-Leistungsstufen*

für den sukzessiven Aufbau eines CPPS setzt sich vor allem die Arbeit von WESTERMANN (2017) in der Feinplanung auseinander. Ebenso gehen mehrere Arbeiten auf die steuerungstechnische *Gestaltung CPPS-spezifischer Anwendungen* ein. Insbesondere DEINDL (2013) legt hierfür einen Ansatz dar, um die CPPS-relevanten Eigenschaften auf Objekt- und Systemebene anwendungsspezifisch zu determinieren. Weiterhin sind differenzierte Ansätze zur *Operationalisierung des Selbststeuerungsgrades* bzw. *Autonomiegrades* ausgeführt, mit dem Ziel die quantitative Beurteilung des CPPS-spezifischen Steuerungseinflusses auf die Produktion zu ermöglichen (vgl. WINDT 2008, THEUER 2012, GRONAU ET AL. 2016). Dem vorhandenen Autonomiegrad wird in einigen Arbeiten der komplexitätsbezogene *Bedarf an Selbststeuerung* bzw. *Autonomie* gegenübergestellt, um damit den geeigneten Autonomiegrad hinsichtlich relevanter Zielgrößen zu determinieren. Insgesamt lässt sich jedoch festhalten, dass bei den Ansätzen kein nennenswerter Bezug zur Grobplanung veränderungsfähiger Produktionssysteme hergestellt wird, wie die Bewertungsübersicht (vgl. Abschnitt 3.4) zeigt. Lediglich die Ansätze von HÖRAUF (2019) und SCHOLER (2018) befassen sich mit der Rekonfiguration CPPS-spezifischer Steuerungseigenschaften in der Feinplanung.

3.3 Modellierung von Produktionssystemen

Angesichts stetig wachsender Informationsmengen nimmt die Dynamik in der Planung von Produktionssystemen zu, weshalb es einer zielgerichteten und strukturierten Datenbereitstellung und Modellierung bedarf (RUDOLF 2007, HORLER & MÜLLER 2017). Folglich beschäftigten sich zahlreiche Forschungsarbeiten, abhängig vom Planungsthema, mit strukturierten Modellen für Produktionssysteme bzw. deren Systemelemente. Die Modelle beruhen im Wesentlichen auf dem fähigkeitsbasierten PPR-Konzept (vgl. Abschnitt 2.3.3) und umfassen dementsprechend sowohl eine detaillierte Beschreibung und Klassifizierung von Produktionsressourcen als auch deren Zusammenhänge und Abhängigkeiten mit Prozessen und Produkten. Im Folgenden sind die themenspezifisch relevanten Arbeiten zunächst aus der Produktionssystemplanung (Abschnitt 3.3.1) dargelegt, ehe auf weitere Modelle mit Bezug zu CPPS aus angrenzenden Themenbereichen (Abschnitt 3.3.2) eingegangen wird.

3.3.1 Modelle in der Produktionssystemplanung

Ein allgemeines Datenmodellkonzept für die integrierte Produkt- und Prozessplanung von Fertigungs- und Montagesystemen definierte STEINWASSER (1996). Das

abstrakt gehaltene Datenmodell unterteilt sich in die Partialmodelle Produkte, Ressourcen und Prozesse, welche die erforderlichen Informationen, Abläufe und Komponenten für das Planungsvorhaben beinhalten. Die Basis für die Verknüpfung der Partialmodelle bildet eine fähigkeitsbasierte Beschreibung der Prozesse bzw. Ressourcen gemäß DIN 8580 und DIN 8593-0.

Darauf aufbauend weist die Arbeit von FELDMANN (1997) ein Datenmodell aus, das als zentrales Element eines rechnergestützten Planungsvorgehens die integrierte Produktentwicklung und Montagesystemplanung unterstützt. Zur Abbildung der montagegerechten Bauteilabhängigkeiten ist das Modell um Verbindungsinformationen erweitert. Außerdem unterliegt die Verknüpfung der Partialmodelle der VDI 2860.

JONAS (2000) konzipierte, basierend auf den Ansätzen von STEINWASSER (1996) und FELDMANN (1997), ein systemunabhängiges Datenmodell. Es dient als Grundlage für eine durchgängig rechnergestützte Planung von Montageanlagen parallel zur Produktentwicklung. Um eine informationsdurchgängige Planung auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen zu gewährleisten, beruht die Modellierung der Partialmodelle auf einer hierarchischen Struktur. Dazu wird im Ressourcenmodell zwischen den Ebenen Ressourcen, Stationen und Fertigungsbereichen unterschieden. Analog werden beim Produktmodell relevante Informationen den Baugruppenebenen und Einzelteilen, einschließlich deren Verbindungsart, zugewiesen.

Aufbauend auf FELDMANN (1997) zeigt die Arbeit von LOFERER (2002) ein integriertes PPR-Datenmodell für die rechnergestützte Konfigurationsplanung modularer Montagesysteme (vgl. Abschnitt 3.1.2). Das Modell unterliegt einer fähigkeitsbasierten Beschreibung elementarer Montageoperationen nach VDI 2860 und fokussiert sich auf die funktionale Abbildung der wechselseitigen Abhängigkeiten von Produkt, Prozess und Betriebsmittel. Dazu wird der Einfluss der Produkteigenschaften auf die Betriebsmittel mithilfe von Funktionselementen beschrieben.

Im Rahmen der konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung von Fertigungsfolgenalternativen präsentierte TROMMER (2001) ein integriertes Produkt- und Produktionsmittelmodell für die Auswahl von Fertigungsfolgen. Das Featurebasierte Produktmodell untergliedert sich in drei Hierarchieebenen. Demnach besteht ein Bauteil aus untereinander abhängigen Features in Gestalt von Haupt- und Nebenformelementen, die durch Flächen weiter spezifiziert sind. Diesen einzelnen Ebenen sind geometrische, technologische, funktionale und wirtschaftlich-organisatorische Informationen zugeordnet, die wiederum hierarchisch vererbt sind. Die vererbte Hierarchiestruktur liegt ebenso dem Produktionsmittelmodell zugrunde.

Auf höchster Gliederungsebene wird dabei in Anlehnung an VDI 2815 zwischen Betriebsmitteln differenziert, bevor eine zunehmende Konkretisierung vom generischen zum spezifischen bis zum individuellen Produktionsmittel erfolgt. Weiterhin sind den Produktionsmitteln, analog zum Produkt, die vier Informationskategorien für den Eignungsabgleich zugewiesen, wobei zusätzlich zwischen bauteilspezifischen und -neutralen Anforderungen unterschieden wird.

In Ergänzung zu TROMMER (2001) legte KNOCHE (2005) ein generisches Beschreibungsmodell für Fertigungstechnologien dar, das bei der Technologieauswahl in der Technologieketten- und Fertigungsfolgenplanung unterstützt. Wesentlicher Bestandteil des Modells ist eine fähigkeitsbasierte Technologieklassifizierung in Form einer parametervererbenden Baumstruktur, die die Struktur der DIN 8580 um Detaillierungsebenen für die Maschinenbeschreibung erweitert. Weiterhin liegt für die Spezifizierung der Prozessparameter eine Feature-basierte Beschreibungsbibliothek vor. Diese beinhaltet sowohl allgemeine Technologieeigenschaften als auch werkstückabhängige Strukturmodule zu werkstoff-, geometrie-, genauigkeits- und toleranzbezogenen Eigenschaften, die mit dem Modul zur Spezifikation der Parameterwerte verknüpft sind.

Die Arbeit von MORYSON (2004) beinhaltet ein Datenmodell für die systematische Fertigungsprozessauswahl und deren Kombination zu geeigneten Prozessketten in der Grobplanungsphase. Der Ansatz beruht im Wesentlichen auf einem rechnerunterstützten Anforderungsabgleich zwischen Feature-basierter Produktbeschreibung und manuell ausgewählten Prozessen. Dazu sind in einer Datenbank die Prozesse und Betriebsmittel in Anlehnung an DIN 8580 klassifiziert und mit entsprechenden Eigenschaften beschrieben. Im Fokus der Einzelprozessbewertung stehen die Merkmalsausprägungen hinsichtlich Gestalt, Werkstoff, Abmessung inklusive Toleranz und Oberflächenrauheit. Die abschließende Prozesskettenbildung berücksichtigt darüber hinaus die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Prozessen.

Ein weiteres Datenmodell zur entwicklungs- und planungsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Verfahrensketten präsentierte MÜLLER (2008). In Anlehnung an KNOCHE (2005) liegt dem Partialmodell Produktionsverfahren die erweiterte Taxonomie gemäß den genannten DIN und VDI-Richtlinien zugrunde. Zudem sind die mit den elementaren Produktionsverfahren verknüpften Informationen nach technologischen, beschreibenden und betriebsmittellorientierten Aspekten strukturiert. Ergänzend dazu ist in einem weiteren Partialmodell der Interdependenzabgleich zwischen Produktionsverfahren sowie zwischen Produkt und Verfahren mithilfe einer sogenannten Primärverfahren-Primärverfahren-Matrix

bzw. Produkt-Primärverfahren-Matrix geregelt. Ausprägungsgleiche Produkte sind dafür in übergeordnete Produktklassen gruppiert und in diesen entsprechend ihrer maximalen Ausprägung nach Produktfunktionen, -elementen und -subelementen eingeteilt und beschrieben.

Die Arbeit von KLUGE (2011) zeigt ein abstraktes Fähigkeitsmodell zur Beschreibung und zum Abgleich von Prozessen und Ressourcen für die Grobplanung modularer Montagezellen (vgl. Abschnitt 3.1.1). Die generische Beschreibung der Prozesse nach VDI 2860 und DIN 8593-0 ist erweitert um die Gruppe Justieren und Sonderfunktionen und ermöglicht die Darstellung fähigkeitsbasierter Montagevorranggraphen für zu montierende Produkte. Die Deskription der Montagezelle fußt auf einer hierarchischen, modularen Aufbaustruktur mit entsprechender Ressourcenallokation. Dementsprechend sind Montagezellen anhand ihres technischen Grundaufbaus in manuelle, hybride oder automatisierte Basismodule klassifiziert. Den Basismodulen sind fähigkeitsbeschriebene Prozessmodule zuzuordnen, die Montagevorgänge manuell, teil- oder automatisiert ausführen. Weiterhin ist das Fähigkeitsmodell um ein Merkmalsmodell ergänzt, was eine detaillierte Deskription der Produkte und Ressourcen anhand produkt-, prozess- und kostenbezogener Merkmale ermöglicht.

Aufbauend auf JONAS (2000) und KLUGE (2011) präsentierte HÖRAUF (2019) ein fähigkeitsbasiertes Datenmodell für die Planung und Rekonfiguration CPPS-basierter Montagesysteme (vgl. Abschnitt 3.1.2). Das Modell dient sowohl zur Zuordnung von Betriebsmitteln zu Prozessen als auch zur durchgängigen Informationskopplung zwischen virtueller und realer Welt. Im Produktionsmodell einer Montagelinie ist dazu das Basismodul einer Montagestation, bestehend aus Transport-, Zuführ- und Prozessmodule, um ein Assistenzmodul zur Abbildung der Mensch-Maschine-Kommunikation erweiterbar. Ebenso lassen sich dem Produkt- und Prozessmodell variantenspezifische Informationen für Bauteilfamilien zuordnen, wodurch variantenabhängige Montagevorranggraphen abbildbar sind.

Die Arbeit von SINNWELL (2020) legt im Zuge eines modellbasierten Ansatzes für die integrierte Produkt- und Produktionssystementwicklung eine formale Deskription von Produkt und Produktionssystem dar. Anhand von Stereotypen sind damit, neben den individuellen und gemeinsam genutzten Elementen von Produkt und Produktionssystem (Ressource, Prozess), die Kausalzusammenhänge und Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Modellelementen generisch darstellbar. Zur Spezifizierung der Modellelemente stehen zudem Bibliotheken bereit. Die Ele-

mentbibliotheken enthalten standardisierte Beschreibungen zu unter anderem technologischen Verfahren (z. B. Fertigungsverfahren), Produktionsmitteln (z. B. Transport-, Fertigungstechnik) oder Gestaltungsgrundsätzen (z. B. Produktionsprinzipien, Steuerungsprinzipien).

3.3.2 Weitere CPPS-relevante Modelle

Im Zuge der Entwicklung einer Methodik für die selbstoptimierende Produktionssteuerung konzipierte LAU (2010) Beschreibungsmodelle für Produktionsprozesse, Betriebsmittel und Transportwege. Zur Abbildung der Prozessabfolge wird sich der graphentheoretischen Modellierung bedient. Ausgehend auf dem zu produzierenden Produkt erfolgt hierzu eine Zerlegung des Produktionsprozesses in ausführbare Operationen gemäß DIN 8593-0 und VDI 2860. Analog dazu sind bei der Ressourcenmodellierung die umsetzbaren Operationen jedes Betriebsmittels in einem eigenen Fähigkeitsprofil abgebildet. Anhand fähigkeitsbasierter Zuordnung von auszuführenden Operationen zu Betriebsmitteln wird somit eine automatische Neuplanung der Produktionsabläufe in der Betriebsphase ermöglicht, mit dem Ziel eine gleichmäßige Maschinenauslastung zu erhalten.

Ebenfalls im Themenfeld der produktbasierten Ablaufsteuerung präsentierte OSTGATHE (2012) ein Datenmodell. Das PPR-Modell stellt die zentrale Basis eines Ansatzes dar, um bei hochautomatisierten Produktionssystemen die störungsbedingte Anpassung von Prozessabläufen aufwandsarm zu ermöglichen. Im Produktmodell sind technische Produktinformationen nach technologie-, geometrie-, organisations- und strukturbezogenen Daten kategorisiert und in einer Baumstruktur gegliedert, wobei die geometrische Werkstückgestalt orientiert an KNOCHE (2005) beschrieben ist. Im Prozessmodell sind sowohl die Prozessketten anhand von Petri-Netzen abgebildet als auch die Prozesse nach VDI 2815 und DIN 8580 klassifiziert und angelehnt an MÜLLER (2008) mit entsprechenden Informationen charakterisiert. Das Ressourcenmodell besitzt einen statischen und dynamischen Bereich. Ersterer beschreibt den Aufbau des Produktionssystems und die enthaltenen Arbeitsstationen mit deren Betriebsmitteln. Dabei sind, neben der Technologieklassifizierung und den in Anlehnung an MORYSON (2004) und KNOCHE (2005) ressourcenbezogenen Informationen, stationsbezogene Informationen (z. B. RFID-basierte Kommunikation) hinterlegt. Mit dem dynamischen Bereich erfolgt dagegen die Abbildung des Ressourcenzustandes und der zugeordneten Abläufe, um die alternative Ressourcenauswahl im Produktionsbetrieb zu gewährleisten.

Weiterhin stellte GEIGER (2015) ein strukturiertes Datenmodell für die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung in der auftragsbezogenen Produktion vor. Ähnlich wie bei LAU (2010) liegt hierfür ein graphenbasierter Modellierungsansatz zur produktspezifischen Abbildung der Arbeitsvorgangfolgen zugrunde. Die entsprechende Planungsgrundlage hinsichtlich produkt- und prozessspezifischer Informationen sind in Anlehnung an den REFA-Standard-Arbeitsplan (vgl. REFA 1991) in einem Auftragsmodell erfasst. Darüber hinaus sind in einem Ressourcenmodell die Betriebsmittel anhand von VDI-Richtlinie 2815 und DIN 8580 klassifiziert sowie angelehnt an MORYSON (2004) und OSTGATHE (2012) mit den ressourcenspezifischen Informationen beschrieben. Zusätzlich ist das Ressourcenmodell in ein separates Produktionsmodell integriert, welches Struktur und Layout der Produktionsebene beinhaltet.

Im Kontext der Produktionsplanung liefert die Arbeit von HEES (2017) ein Beschreibungsmodell für rekonfigurierbare Produktionssysteme, um deren konfigurationsabhängigen Eigenschaften in einem Planungssystem abzubilden und zu bewerten. Konkret beinhaltet es einen hierarchisch modularen Aufbau des Produktionssystems und dessen Konfigurationsbereich, der abhängig von möglichen System- und Ressourcenkonfigurationen ist. Der Konfigurationsbereich ist mittels eines hierarchischen Petri-Netz-basierten Modellierungsansatzes in der System- und Ressourcenebene abgebildet und liefert die Basis zur mathematischen Formulierung der zu bewertenden Rekonfigurationsvorgänge in vektorieller Darstellung. Weiterhin sind die modular aufgebauten Ressourcen anhand technologischer und planerischer Informationen spezifiziert. Den planerischen Informationen unterliegt ein eigens entwickeltes Klassifizierungsschema für Fertigungsverfahren und Montageprozesse. Es ergänzt die VDI 2860 bzw. DIN 8580 um weitere Informationen zur Werkstückgestalt, wodurch ein Abgleich von Produkthanforderungen und Ressourcenfähigkeiten in der Produktionsplanung ermöglicht wird.

In engem Bezug zur Produktionssystemplanung konzipierte MICHNIEWICZ (2019) im Bereich der Arbeitsplanung ein Datenmodell für ein simulationsgestütztes Planungssystem. Es dient zur Arbeitsplangenerierung von alternativen Konfigurationen eines CPPS-basierten Montagesystems. Das PPR-Modell unterteilt sich in die Domänen Skill, Produkt und Ressource. Die Skill-Domäne beinhaltet die standardisierte Beschreibung der Montagevorgänge nach elementaren und zusammengesetzten Fähigkeiten gemäß HAMMERSTINGL & REINHART (2017), deren Taxonomie auf die VDI 2860 und DIN 8593-0 aufbaut. Zusätzlich wird bei den Fähigkeiten zwischen vier Instanzen differenziert, wodurch diese hinsichtlich zustandsunabhängiger, -bezogener und geometrischer Aspekte spezifizierbar sind. Die

Ressourcen-Domäne enthält sowohl eine digitale Bibliothek über Betriebsmittel mit deren Eigenschaften als auch ein Umweltmodell hinsichtlich Layout und räumlicher Ressourcenanordnung im Montagesystem. Zudem repräsentiert ein davon abgeleitetes graphenbasiertes Fähigkeitenmodell die durchführbaren Operationen im Montagesystem. In der Produkt-Domäne erfolgt die Feature-basierte Produktmodellierung und die darauf basierende Ableitung eines Aufgabenmodells, das die produktspezifischen Montageanforderungen fähigkeitsbasiert in alternativen Montagereihenfolgen wiedergibt. Anhand von Aufgaben- und Fähigkeitenmodell wird somit die Prozess-Ressourcen-Zuordnung ermöglicht.

3.3.3 Fazit

Die dargelegten Ausführungen zeigen, dass sich im Bereich der Produktionssystem-, der Arbeits- oder Produktionsplanung und -steuerung verschiedene Ansätze mit PPR-Modellen beschäftigen. Die *fähigkeitsbasierte Prozess- und Ressourcendeskription* stellt in den PPR-Modellen das zentrale Element für deren einheitliche Charakterisierung und Verknüpfung dar. Zudem gehen Arbeiten auf *Modularisierungs- und Automatisierungseigenschaften bei der Ressourcendeskription* ein (vgl. z. B. KLUGE 2011). Ferner liegt Arbeiten, wie die von TROMMER (2001) oder MICHNIEWICZ (2019), eine *Feature-basierte Produktbeschreibung* individueller Bauteile eines zu bearbeitenden Werkstückspektrums zugrunde, um insbesondere deren prozessspezifischen Anforderungen zu charakterisieren. Die Beschreibung *steuerungsrelevanter CPPS-Eigenschaften* von Produkten, Prozessen und Ressourcen finden dagegen, wie auch die Bewertungsübersicht (vgl. Abschnitt 3.4) verdeutlicht, nur rudimentär statt.

3.4 Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfs

In diesem Abschnitt sind die vorgestellten Forschungsarbeiten zusammengefasst und der davon abgeleitete Handlungsbedarf für diese Forschungsarbeit dargestellt. Die Ansätze sind dazu, vergleichend anhand deren Erfüllungsgrad für die definierten Kriterien, in den drei Themenbereichen (vgl. Abschnitt 3.1.3, 3.2.3 und 3.3.3) bewertet (Abbildung 24).

Bewertungskriterien: <input type="radio"/> nicht / kaum erfüllt <input type="radio"/> teilweise erfüllt <input checked="" type="radio"/> erfüllt	Veränderungsfähige Planung						CPPS-orientierte Ansätze				Modellierung			
	Grobplanung modularer Fertigungszellen	Lebenszyklusbetrachtung	Anforderungsbezogener Eignungsabgleich	Automatisierungsstufen	Skalierungskonzept	Kosten- und Leistungsbewertung	Ermittlung CPPS-spezifischer Selbststeuerungsbedarf	CPPS-Leistungsstufen	Gestaltung CPPS-spezifischer Anwendungen	Operationalisierung CPPS-spezifischer Selbststeuerungsgrad	Feature-basierte Produktbeschreibung	Fähigkeitsbasierte Prozess- und Ressourcenbeschreibung	Ressourcenbeschreibung bzgl. Modularität und Automatisierung	Steuerungsspezifische CPPS-Eigenschaften
Planung veränderungsfähiger Produktionssysteme														
Neuhausen (2001)	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Loferer (2002)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Slama (2004)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Blumenau (2006)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Drabow (2006)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Kluge (2011)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pachow-Frauenhofer (2012)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Wang & Koren (2012, 2013)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Landherr (2014)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Neumann (2015)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Eilers (2015)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Benkamoun (2016)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Sauer (2017)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Hörauf (2019)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Stähr (2020)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
CPPS-spezifische Gestaltung von Produktionssystemen														
Frohm (2008)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Windt (2008), Böse (2012), Philipp (2014)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Wycsik (2009)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Theuer (2012), Lass et al. (2013)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Deindl (2013)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Gronau et al. (2016), Grum et al. (2016)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Gronau (2016, 2018, 2019)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Grundstein et al. (2017)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Westermann (2017)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Sinnwell et al. (2017), Cadet et al. (2017)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Winkler et al. (2017)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Köchling (2018)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Scholer (2018)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Kiefer et al. (2019), Kiefer (2020)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Bauer et al. (2019), Styr et al. (2020)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Modellierung von Produktionssystemen														
Steinwasser (1996)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Feldmann (1997)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Jonas (2000)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Trommer (2001)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Moryson (2004)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Knoche (2005)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Müller (2008)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Lau (2010)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ostgathe (2012)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Geiger (2015)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Hees (2017)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Michniewicz (2019)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Sinnwell (2020)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Abbildung 24: Übersicht und Bewertung bestehender Forschungsansätze

Aus der Untersuchung des **Forschungsstands** zeigt sich, dass kein Ansatz die gegebenen Kriterien für die forschungsleitende Zielsetzung (vgl. Abschnitt 1.3) hinreichend erfüllt. Die Forschungsarbeiten betrachten jedoch relevante Teilbereiche. Im Themenfeld der *Planung modularer Produktionssysteme* befassen sich Arbeiten mit deren Skalierung und sukzessiven Anpassung vom Automatisierungsgrad. Die CPPS-relevanten Steuerungseigenschaften finden aber nahezu keine Berücksichtigung. Dagegen gehen die *CPPS-orientierten Gestaltungsansätze* auf die CPPS-Spezifika ein, stellen allerdings keinen nennenswerten Bezug zur Grobplanung veränderungsfähiger Produktionssysteme her. Bei den *Modellierungsansätzen* gibt es vielfältige Modelle zu Produktionssystemen, die sich auf die physischen Aspekte von Produkten, Prozessen und Ressourcen konzentrieren. Steuerungsspezifische CPPS-Eigenschaften werden hierbei aber nur ansatzweise betrachtet.

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass die Entwicklung einer Methodik zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen ein **Forschungsdesiderat** darstellt, um den sukzessiven Ausbau von Fertigungssystemen mit CPPS-Strukturen (vgl. Abschnitt 2.2.2) zu ermöglichen. Die Spezifika der veränderungsfähigen und CPPS-orientierten Ansätze sind demnach zu kombinieren und in ein strukturiertes Planungsverfahren zu überführen, um entsprechend der Lebenszyklusanforderungen Ausbaustufenkonzepte für Fertigungszellen zu entwickeln sowie hinsichtlich deren Eignung zu bewerten (*Teilziel 3*). Im Fokus steht dabei die modellbasierte Konfiguration bzw. Rekonfiguration modularer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen (*Teilziel 2*). Da es bei der Planung diverse Aspekte zu berücksichtigen gilt, sind zudem geeignete Beschreibungsmodelle zu konzipieren, die den Planungsprozess unterstützen (*Teilziel 1*).

4 Anforderungsbezogene Konzeption der Methodik

4.1 Anforderungen an die Methodik

Entsprechend der Zielstellung dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 1.3), dem Betrachtungsraum (vgl. Kapitel 2) und dem dargelegten Handlungsbedarf (vgl. Abschnitt 3.4) gilt es eine Methodik mit einzelnen Lösungsbausteinen (Abschnitt 4.2) zu entwickeln, die Produktionssystemplaner bei der Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellkonzepte in CPPS-Strukturen unterstützen soll. Abgeleitet hier-von sind gewisse Anforderungen an die Methodik (Tabelle 1) definiert. Im Nachfolgenden werden eingangs allgemeine Anforderungen (Abschnitt 4.1.1) erläutert, ehe auf inhalts- (Abschnitt 4.1.2) und anwendungsspezifische (Abschnitt 4.1.3) Anforderungen eingegangen wird.

Tabelle 1: Anforderungen an die Methodik

Kategorie	Anforderungen
Allgemein	Planungsziel
	Planungsobjekt
	Planungsinformationen
Inhalts-spezifisch	Modellbasierte Deskription modularer Fertigungszellkonfigurationen
	Modellbasierte Generierung modularer Fertigungszellkonfigurationen
	Umfassende Betrachtung planungsrelevanter Rahmenbedingungen
	Lebenszyklusorientierte Entwicklung modularer, skalierbarer Fertigungszellen
	Ganzheitliche Bewertung alternativer Fertigungszellkonzepte
Anwen-dungs-spezifisch	Übertragbarkeit
	Transparenz
	Integrationsfähigkeit
	Erweiterbarkeit

4.1.1 Allgemeine Anforderungen

Die allgemeinen Anforderungen dienen bei der zu entwickelnden Methodik zur Berücksichtigung struktureller Aspekte und Einordnung in die Produktionssystemplanung. Entsprechend sind drei allgemeine Anforderungen formuliert:

- *Planungsziel*: Das erklärte Planungsziel der Methodik liegt in der lebenszyklusorientierten Grobplanung modularer, skalierbarer Fertigungszellen

in CPPS-Strukturen, um die adäquate Ausschöpfung von Produktivitäts- und Flexibilitätpotenzialen in der individualisierten Serienproduktion zu ermöglichen. Die wesentliche Herausforderung besteht dabei in der unsicheren Entwicklung der Planungsanforderungen über den Lebenszyklus hinweg. Dementsprechend gilt es, bereits zum frühen Zeitpunkt der Neuplanung, den anforderungsgerechten Ausbau einer Initialkonfiguration abhängig von CPPS-spezifischen Aspekten zu planen, damit eine bestmögliche Investitionsentscheidung für eine Initialkonfiguration mit möglichen Ausbaustufenfolgen (Ausbaustufenkonzept) getroffen werden kann.

- *Planungsobjekt:* Das Planungsobjekt umfasst die Fertigungszelle als Bestandteil eines Fertigungssystems mit CPPS-Strukturen. Die Zelle vereint zur Ausführung von Produktionsprozessen Ressourcen und unterliegt einer strukturellen Verknüpfung. Dabei gilt es entsprechend der Fabrikhierarchisierung die Ebenen Fertigungszelle, Arbeitsstation sowie den Aufbau von Betriebsmitteln (Maschine und Komponente) zu betrachten. Im CPPS-Kontext ist dabei neben der modularen, hierarchischen Gestalt auch der anpassbare Automatisierungsgrad in Hinblick auf physische und digitale Prozesse zu berücksichtigen.
- *Planungsinformationen:* Die zur Verfügung stehenden Planungsinformationen beinhalten insbesondere produkt- und ressourcenspezifische Aspekte, um den Planungsvorgang zu ermöglichen. Dazu gehören sowohl ein szenariobasiertes Fertigungsprogramm mit lebenszyklusorientierter Stückzahl- und Bauteilmixentwicklung als auch die Struktur des Produktionssystems, deren Betriebsmittel und entsprechenden CPPS-spezifische Eigenschaften zur Umsetzung physischer und digitaler Prozessen.

4.1.2 Inhaltsspezifische Anforderungen

Die inhaltsspezifischen Anforderungen beziehen sich auf die inhaltlichen Schwerpunkte, die bei der Methodikentwicklung zu berücksichtigen sind. Basierend auf den Ausführungen zur Methodik (vgl. Abschnitt 2.3.1) wird dabei zwischen dem Modell für die systemtechnische Umsetzung und der Methode für das systematische Vorgehen unterschieden. Die definierten inhaltlichen Anforderungen sind nachfolgend aufgeführt, wobei bei den beiden erstgenannten der modell- und bei den drei weiteren der methodenbasierte Ansatz im Fokus stehen:

- *Modellbasierte Deskription modularer Fertigungszellkonfigurationen:* Der modellbasierten Abbildung modular konfigurationsabhängiger Fertigungs-

zellen in CPPS-Strukturen muss eine standardisierte Beschreibung der Prozesse und Ressourcen zugrunde liegen. Dabei sind insbesondere deren CPPS-spezifischen Modularisierungs- und Automatisierungsaspekte auf Objekt- und Systemebene zu spezifizieren. Zugleich sind individualisierte Bauteile entsprechend zu beschreiben, um einen prozessbezogenen Anforderungs-Eignungsabgleich mit den Ressourcen zu ermöglichen. Im Allgemeinen ist bei der generischen Beschreibung auf etablierte Normen und Standards zurückzugreifen.

- *Modellbasierte Generierung modularer Fertigungszellkonfigurationen:* Die Planungsmethodik muss die modellbasierte Gestaltung alternativer Zellkonfigurationen in CPPS-Strukturen ermöglichen, mit dem Ziel die Planungskomplexität aufgrund einer Vielzahl an planungsrelevanten Variablen zu beherrschen. Im Fokus steht dabei die technische und kapazitätsbezogene Auslegung der konfigurationsabhängigen Fertigungszellen einschließlich deren Rekonfiguration. Zugleich ist darauf zu achten, dass das Erfahrungswissen und die Kreativität des Planers in den Konfigurationsprozess einbezogen wird.
- *Umfassende Betrachtung planungsrelevanter Rahmenbedingungen:* Das Planungsvorgehen ist speziell für die Planung im CPPS-Kontext zu konzipieren und setzt eine eingehende Prüfung CPPS-spezifischer Randbedingungen voraus. Daneben muss der Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen eine vorausschauende, szenariobasierte Lebenszyklusbetrachtung zugrunde liegen, da Rekonfigurationen zukünftig auftreten und prognostizierte Anforderungen (Veränderungstreiber) entlang des Lebenszyklus gewisse Unsicherheiten zum Planungszeitpunkt aufweisen. Zu berücksichtigen sind ebenso die an ein Planungsvorhaben geknüpften Zielvorgaben.
- *Lebenszyklusorientierte Entwicklung modularer, skalierbarer Fertigungszellen (Ausbaustufenkonzepte):* Aufgrund unsicherer Lebenszyklusentwicklungen und Vielzahl an Planungsvariablen im CPPS-Kontext ist eine große Bandbreite an alternativen Ausbaustufenkonzepten denkbar, weshalb der Planer in der zielorientierten Entwicklung alternativer *Ausbaustufenkonzepte* zu unterstützen ist. Neben der sukzessiven Anpassung des Automatisierungsgrades, gilt es anderweitige Veränderungsstrategien einzubeziehen, um eine differenzierte Auswahl an Konzeptalternativen zu erhalten.
- *Ganzheitliche Bewertung alternativer Fertigungszellkonzepte:* Zur Auswahl eines Ausbaustufenkonzeptes bzw. einer geeigneten Initialkonfiguration mit möglichen Ausbaustufenfolgen ist eine Investitionsentscheidung

unter Unsicherheit zu treffen. Dazu bedarf es eine szenariobasierte Bewertung von Leistungsfähigkeit und Kosten für den gesamten Lebenszyklus vorzunehmen, wobei vor allem CPPS-Spezifika zu berücksichtigen sind.

4.1.3 Anwendungsspezifische Anforderungen

Neben den allgemeinen und inhaltspezifischen Anforderungen muss eine Methodik Anforderungen für deren praktische Anwendung erfüllen. Im Arbeitsumfeld von Produktionssystemplanern sind demnach für die zu entwickelnde Methodik die nachfolgenden anwendungsspezifischen Anforderungen bezüglich deren fall-spezifischen Einzelanwendungen sicherzustellen:

- *Übertragbarkeit:* Die Methodik ist für den Einsatz in der diskreten Serienfertigung bei Unternehmen zu entwickeln. Es muss dafür eine gewisse Übertragbarkeit bzw. Allgemeingültigkeit gewährleisten, um auf branchen- und unternehmensunabhängige Anwendungsfälle im CPPS-Kontext anwendbar zu sein.
- *Transparenz:* In Hinblick auf die Praxistauglichkeit bedarf es einer hohen Transparenz, um die Nachvollziehbarkeit des Methodikablaufs und der Planungsergebnisse für den Anwender zu ermöglichen. Dementsprechend sind Modelle und Vorgehensweise für den Anwender verständlich und zusammenhängend darzulegen.
- *Integrationsfähigkeit:* Die Integrationsfähigkeit bestehender Planungswerkzeuge, Modelle und Methoden eines Unternehmens in die Planungsmethodik ist von zentraler Bedeutung. Nur somit wird die Akzeptanz des Methodeneinsatzes in bestehenden Unternehmensstrukturen gewährleistet.
- *Erweiterbarkeit:* Die Methodik muss den Aspekt der aufwandsarmen Erweiterbarkeit berücksichtigen, da je nach Unternehmen oder Abstraktionsgrad individuelle Aspekte, wie z. B. unterschiedliche Bewertungskriterien relevant oder gewisse Informationen schwer zugänglich sind.

4.2 Überblick zum Aufbau der Methodik

Aufbauend aus den definierten Anforderungen besteht der Aufbau der entwickelten **Methodik** (Abbildung 25) zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen aus drei Lösungsbausteinen und greift die Vorbereitungs- und Grobplanungsphase der Produktionssystemplanung (vgl. Abschnitt 2.3.1) auf.

Den Ausgangspunkt der in sich geschlossenen Methodik bilden Eingangsinformationen im Hinblick auf das CPPS-basiertes Fertigungskonzept und den lebenszyklusorientierten Planungsszenarien für das zu bearbeitende Fertigungsprogramm. Auf Basis dessen findet das methodische Planungsvorgehen in den einzelnen Phasen Analyse der Rahmenbedingungen, Gestaltung der Ausbaustufenkonzepte sowie Bewertung und Auswahl statt, wobei das Datenmodell die systematische Deskription und die darauf aufbauende Konfigurationsmodellierung die Gestaltung von Zellkonfigurationen ermöglichen. Als Ergebnis liegt eine Initialkonfiguration mit alternativen Ausbaustufenfolgen zu einem präferierten Ausbaustufenkonzept vor.

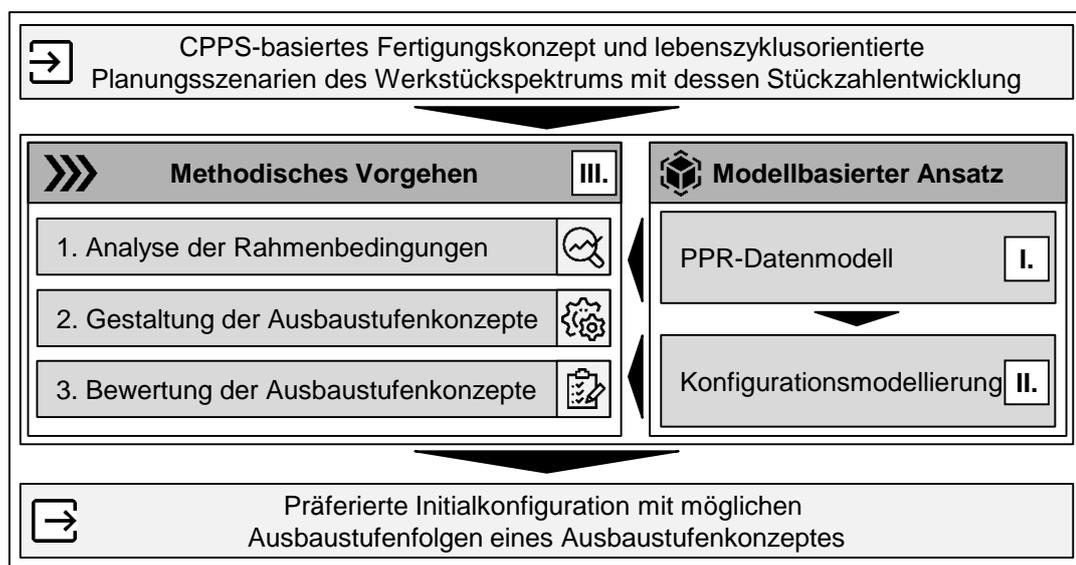


Abbildung 25: Übersicht der Methodik nach VOIT ET AL. (2023)

Das generische **PPR-Datenmodell** stellt die wesentliche Grundlage der Planungsmethodik hinsichtlich der systemtheoretischen Deskription von Planungsinformationen und Planungsobjekt dar. Dem Modell unterliegt eine standardisierte Beschreibungssystematik, die auf etablierten Normen und Richtlinien sowie gängigen Modellierungs- und Klassifikationsansätzen beruht. Entsprechend dem fähigkeitsbasierten PPR-Konzept (vgl. Abschnitt 2.3.3) sind dabei die Partialmodelle Produkt, Prozess und Ressource definiert, die vor allem um CPPS-spezifische Modularisierungs- und Automatisierungsaspekte erweitert sind.

Aufbauend auf den generischen Beschreibungsmodellen lassen sich mithilfe der **Konfigurationsmodellierung** alternative Fertigungszellkonfigurationen unter Berücksichtigung CPPS-spezifischer Aspekte systematisch gestalten. Um dabei trotz des großen potenziellen Lösungsraums eine zielorientierte und modellgetriebene Alternativengenerierung zu ermöglichen, liegen dem Modellierungsansatz

fünf voneinander abhängige Konfigurationsbausteine zugrunde. Die Konfigurationsbausteine decken die technische und kapazitätsbezogene Gestaltung konfigurationsabhängiger Fertigungszellen sowie deren Rekonfiguration ab.

Die modellbasierte Deskription und Konfiguration dienen der systematischen Erkenntnisgewinnung im Rahmen des methodischen **Planungsvorgehens**, das in drei Planungsphasen strukturiert ist. Ausgehend von den Eingangsinformationen erfolgt in der ersten Phase des methodischen Vorgehens eine Analyse der grundlegenden Rahmenbedingungen für das Planungsvorhaben. Darauf basierend wird mit der zweiten Phase die lebenszyklusorientierte Erarbeitung modularer, skalierbarer Fertigungszellen (Ausbaustufenkonzepte) vollzogen. Abschließend ermöglicht die dritte Phase eine ganzheitliche Bewertung der alternativen Ausbaustufenkonzepte, um trotz unsicherer Lebenszyklusentwicklung eine geeignete Initialkonfiguration mit möglichen Ausbaustufenfolgen auszuwählen.

4.3 Fazit

Basierend auf dem Forschungsdesiderat (vgl. Abschnitt 3.4) zur Entwicklung einer Planungsmethodik für modulare, skalierbare Fertigungszellen in CPPS-Strukturen erfolgte in diesem Kapitel zunächst die Ableitung von Anforderungen an die Konzeption einer solchen Methodik. Die erarbeitete Methodik wurde entsprechend in drei Lösungsbausteine strukturiert. Während die methodische Vorgehensweise (Lösungsbaustein 3) die schrittweise Erarbeitung von Ausbaustufenkonzepten in den Phasen Analyse, Gestaltung und Bewertung ermöglicht, unterstützen das Datenmodell (Lösungsbaustein 1) und die Konfigurationsmodellierung (Lösungsbaustein 2) bei der systematischen Beschreibung bzw. Gestaltung entsprechender Fertigungszellkonfigurationen. In den nachfolgenden Kapiteln werden die modellbasierte Deskription und Konfiguration (Kapitel 5) sowie das methodische Planungsvorgehen (Kapitel 6) der entwickelten Methodik detailliert erläutert, bevor die Evaluation anhand eines exemplarischen Anwendungsfalls (Kapitel 7) stattfindet.

5 Modellbasierte Deskription und Konfiguration

Das fünfte Kapitel legt die modellbasierte Deskription und Konfiguration für die systematische Gestaltung von Zellkonfigurationen in CPPS-Strukturen dar. Der modellgetriebene Ansatz dient zur abstrahierten und vereinfachten Abbildung und Umsetzung des Konfigurationswissens (vgl. Abschnitt 2.3.3) in der Planungsmethodik. Einleitend erfolgt dazu die Deskription des Wissensvolumens im PPR-Datenmodell (Abschnitt 5.1). Darauf basierend wird die Konfigurationsmodellierung (Abschnitt 5.2) vorgestellt, die bei der modellgestützten Generierung von Zellkonfigurationen unterstützt.

5.1 Produkt-Prozess-Ressourcen-Datenmodell

Das strukturierte **PPR-Datenmodell** (Abbildung 26) beschreibt relevante Planungsinformationen und Zusammenhänge und stellt das generische Abbild zur Gestaltung modularer Fertigungszellen im CPPS-Kontext dar. Das Datenmodell ist aufbauend auf dem PPR-Konzept (vgl. Abschnitt 2.3.3) entwickelt und untergliedert sich in die drei miteinander verknüpften Partialmodelle Produkt, Prozess und Ressource. Das Modell fußt dazu auf bewährten Ansätzen zur fähigkeitsbasierten PPR-Modellierung (vgl. Abschnitt 3.3), die um CPPS-spezifische Modularisierungs- und Steuerungsaspekte erweitert sind. Demnach erfolgt eine technologische und steuerungstechnische Verknüpfung der PPR-Partialmodelle.

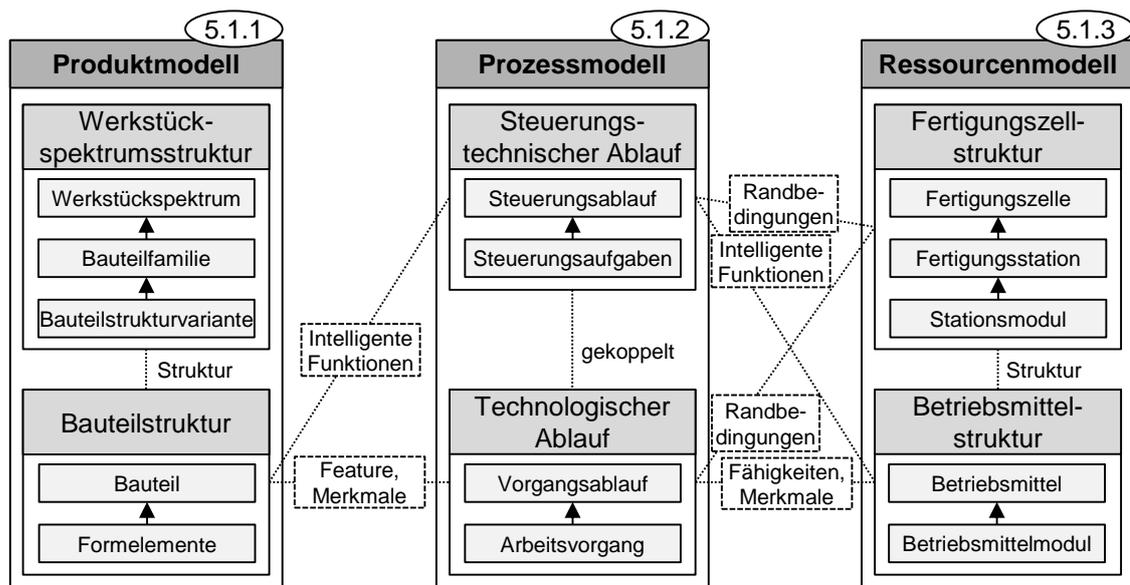


Abbildung 26: Datenmodell mit dessen Partialmodellen nach VOIT ET AL. (2023)

Das **Prozessmodell** (Abschnitt 5.1.2) beinhaltet wesentliche Grundlagen zur generischen Deskription technologischer und steuerungstechnischer Prozesse und deren Prozessabläufe und verknüpft darüber die Partialmodelle. Die technologische Prozessbeschreibung erfolgt technologieneutral und -spezifisch. Die technologieneutralen Prozesse charakterisieren über Prozess-Features und Merkmale die zur Produktherstellung erforderlichen Wertschöpfungsschritte, die durch eine oder mehrere Technologien realisiert werden. Die technologiespezifischen Prozesse sind anhand einer fähigkeitsbasierten Taxonomie und Merkmalen spezifiziert und erfordern für deren Ausführung steuerungstechnische Prozesse. Die steuerungstechnischen Prozesse werden anhand intelligenter Funktionen beschrieben, die einzeln oder kombiniert CPPS-spezifische Anwendungen ermöglichen.

Das **Ressourcenmodell** (Abschnitt 5.1.3) behandelt die hierarchische Struktur und die Eigenschaften auf Systemebene für die Fertigungszelle und auf der darunterliegenden Objektebene für Betriebsmittel. Die Systemebene charakterisiert dazu den modular hierarchischen Aufbau und die steuerungstechnischen Randbedingungen von Fertigungszellen in CPPS-Strukturen. Ebenso ist der strukturelle Aufbau von Betriebsmitteln über Betriebsmittelmodule determiniert. Deren Deskription hinsichtlich technologischer Eigenschaften beruht auf der fähigkeitsbasierten Klassifizierung sowie spezifizierenden Prozess- bzw. Ressourcenmerkmalen. Steuerungsrelevante CPPS-Eigenschaften sind dagegen mittels Automatisierungsstufen und IuK-Technologien, die die technologische Umsetzung der intelligenten Funktionen ermöglichen, beschrieben.

Mit dem **Produktmodell** (Abschnitt 5.1.1) sind werkstückspezifische Informationen zu individualisierten Bauteilen dargelegt. Das zu bearbeitende Werkstückspektrum ist dazu in Bauteilfamilien gegliedert, die wiederum Bauteilstrukturvarianten beinhalten, die strukturgleiche, individualisierte Bauteile repräsentieren. Zur Ableitung der technologischen Anforderungen an den Fertigungsprozess sind die Bauteileigenschaften anhand einer Form-Feature- und merkmalsbasierten Taxonomie spezifiziert. Ebenso sind, analog zum Ressourcenmodell, über den Zusammenhang von IuK-Technologien mit intelligenten Funktionen die steuerungstechnischen Eigenschaften determiniert.

5.1.1 Produktmodell

Das Produktmodell dient zur generischen Beschreibung von werkstückspezifischen Informationen und unterliegt gewissen Regeln, um über die PPR-Verknüp-

fung die werkstückspezifischen Anforderungen an die auszuführenden Produktionsprozesse zu spezifizieren. Die Bestandteile und Eigenschaften eines Werkstückspektrums mit individualisierten Bauteilen (vgl. Abschnitt 2.1.1) werden dazu anhand von Strukturvarianten charakterisiert.

Der hierarchische Aufbau (Abbildung 27) eines solchen **Werkstückspektrums** gliedert sich, angelehnt an ELMARAGHY ET AL. (2009), in Bauteilfamilien (z. B. Wellen), die Bauteilstrukturvarianten zu individualisierten Bauteilen mit ähnlichen Eigenschaften zusammenfassen. Eine Bauteilstrukturvariante (z. B. Stirnräder, Kegelräder) verkörpert in Anlehnung an LINDEMANN & MAURER (2006) den Lösungsraum strukturell zugehöriger Bauteile mit deren möglichen, individuellen Ausprägungen (z. B. individuelles Stirnrad). Die einzelnen Bauteile sind dazu anhand einer parametrisierten Feature-Beschreibung (vgl. Abschnitt 2.3.3) mit deren Formelementen (z. B. Zahnprofil) spezifiziert.

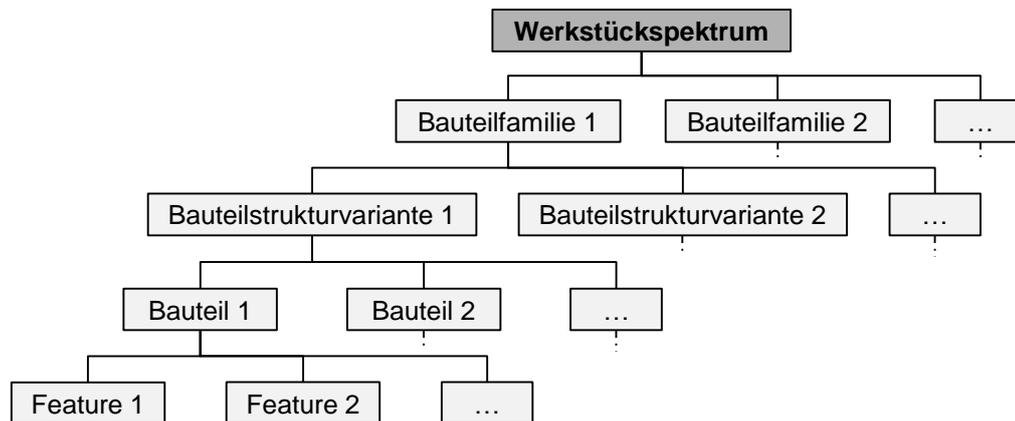


Abbildung 27: Hierarchieebenen des Werkstückspektrums aufbauend auf ELMARAGHY ET AL. (2009)

Zentrale Grundlage bauteilrelevanter Informationsmodelle stellen CAD-basierte Produktrepräsentanten (vgl. Abschnitt 2.3.3) dar. Als visuelles Hilfsmittel zur einheitlichen Beschreibung und strukturierten Zusammenstellung individualisierter Bauteile anhand einer **Bauteilstrukturvariante** dient der Produktsteckbrief (Abbildung 28). Neben allgemeinen Informationen steht die konstruktive Deskription über die nachfolgend beschriebenen Formelemente und Produktmerkmale mit deren Ausprägungen und Einheiten im Fokus. Zudem sind steuerungstechnische Angaben in Form intelligenzbezogener Informationen anhand von IuK-Technologien entsprechend den Ausführungen im Ressourcenmodell (vgl. Abschnitt 5.1.3.2) aufgeführt, die oftmals über Werkstückträger umgesetzt sind.

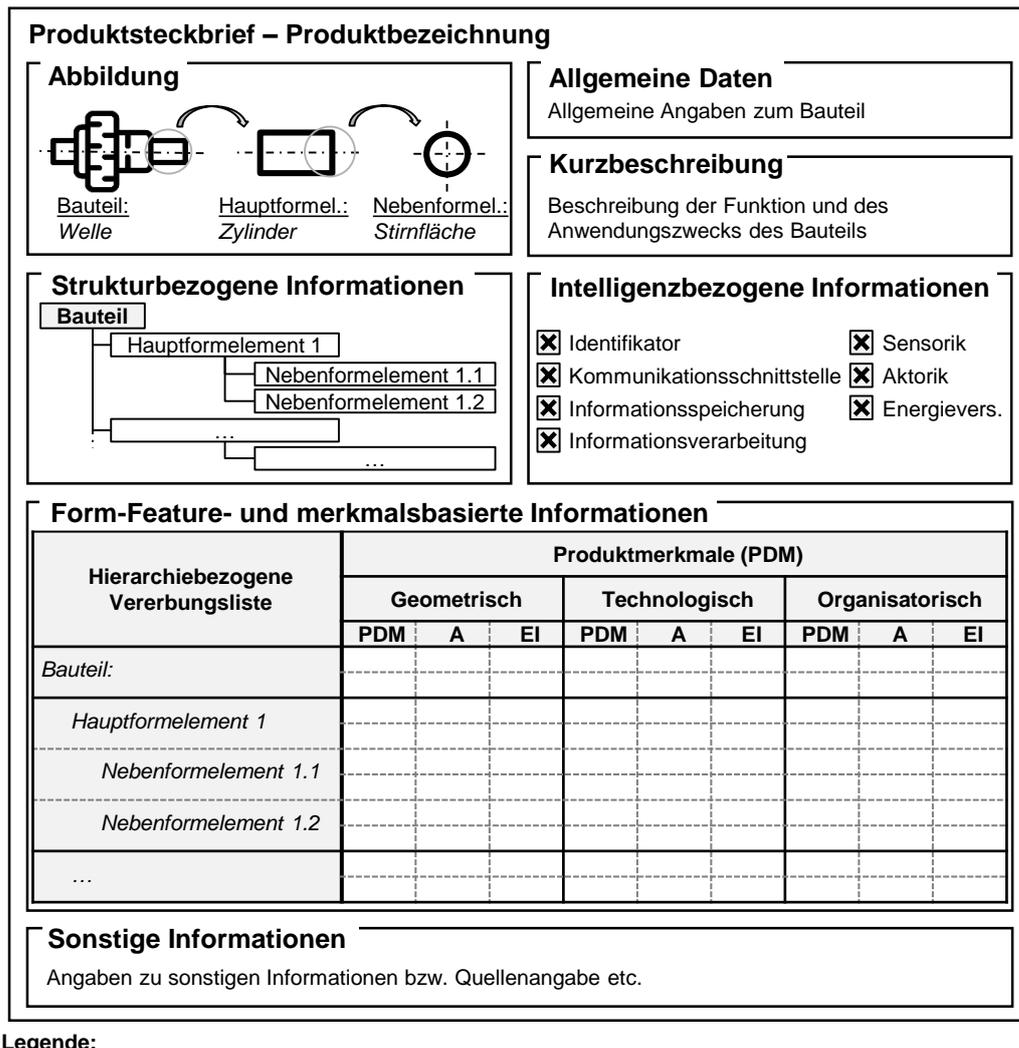


Abbildung 28: Struktureller Aufbau des Produktsteckbriefs

Die konstruktive Gestalt von Bauteilen und damit deren Eigenschaften für den mechanischen Herstellungsprozess lassen sich anhand von **Form-Features** (vgl. Abschnitt 2.3.3) determinieren. Demnach sind Formelemente als Grundbestandteile eines Bauteils anhand einer Feature-Taxonomie und weiterer Merkmale mit deren Ausprägungen (z. B. Werkstoff- und Genauigkeitsangaben) standardisiert charakterisiert. Bei den Formelementen wird grundsätzlich hinsichtlich Haupt- (3D-Flächen) und Nebenformelementen (2D-Flächen) differenziert, wobei letztere nicht alleinstehend sind (KNOCH 2005). Über die Ebenen kann somit jedes Hauptformelement in der vorletzten Ebene bzw. das Flächenelement (Nebenformelement) in der letzten Ebene beschrieben werden (vgl. Abbildung 28). Beispielsweise kann die Deskription der Hauptformelemente (Abbildung 29) durch rotations- und nicht rotationssymmetrische Formen erfolgen. Hinsichtlich detaillierter Ausführungen

zu Feature-Bibliotheken wird auf die einschlägige Literatur (vgl. z. B. OWODUNNI ET AL. 2002, MORYSON 2004, KNOCH 2005) verwiesen.

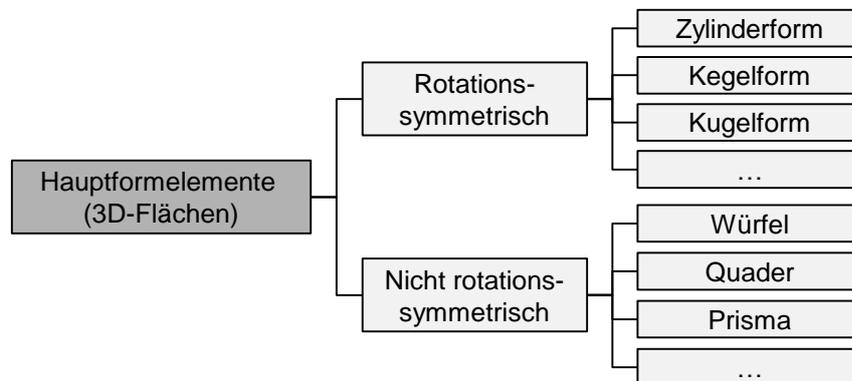


Abbildung 29: *Deskription von Hauptformelementen nach KNOCH (2005) und OSTGATHE (2012)*

Zur Parametrisierung von Bauteilen und deren Formelemente sind diesen entsprechend der hierarchischen Strukturebene vererbte **Produktmerkmale** zuzuordnen. Analog zum Betriebsmittelsteckbrief (vgl. Abschnitt 5.1.3.2) und in Anlehnung an TROMMER (2001) und OSTGATHE (2012) wird dabei hinsichtlich geometrischer, technologischer und organisatorischer Produktmerkmale unterschieden. Die geometrischen Merkmale liefern Informationen zu beispielsweise Durchmesser oder Länge. Technologische Merkmale beziehen sich auf Angaben, wie etwa Werkstoffe inkl. deren Eigenschaften (vgl. z. B. KNOCH 2005) oder Toleranzen (vgl. z. B. DIN EN ISO 1101). Dagegen zählen zu den organisatorischen Merkmalen Informationen wie z. B. Identifikationsnummer, Status oder Stapelfähigkeit. Darüber hinaus unterliegen die Ausprägungen (z. B. 1 mm) bei den einzelnen Produktmerkmalen standardisierten Maßeinheiten (vgl. z. B. KNOCH 2005). Bei den Ausprägungen kann zwischen nominalen (Aufzählung ohne Reihenfolge), ordinalen (Aufzählung mit Reihenfolge) und metrischen (Wertebereich mit Reihenfolge) Bereichsangaben differenziert werden.

Um die Vielfalt an auftretenden Produktmerkmalen und deren Ausprägungen für Bauteilfamilien des Werkstückspektrums zu bestimmen, sind die Bauteilstrukturvarianten zu aggregieren. Als zentrales Hilfsmittel dient hierbei die aufbauend auf NEUHAUSEN (2001) entwickelte Bauteilfamilienstrukturmatrix (Abbildung 30). Dabei werden die einzelnen Strukturvarianten der **Bauteilfamilien** den Produktmerkmalen und deren Ausprägungen gegenübergestellt. Somit kann für jedes Produktmerkmal in der Bauteilfamilie die Vielfalt bzw. Varianz der Ausprägungen abhängig von den Strukturvarianten determiniert werden.

Abhängigkeiten

Merkmalsgruppe		Produktmerkmale	Anzahl Ausprägungen	Ausprägungen	Bauteilfamilien												
					BF 1		BF 2		...								
GEM		PDM 1	1	A 1.1	Anzahl Bauteilstrukturvarianten												
					6		5		...								
TEM		PDM 2	80	A 2.1	Bauteilstrukturvarianten												
					BSTV 1.1	BSTV 1.2	BSTV 1.3	BSTV 1.4	BSTV 1.5	BSTV 1.6	BSTV 2.1	BSTV 2.2			
ORM		PDM 6	2	A 6.1													
					BSTV 1.1	BSTV 1.2	BSTV 1.3	BSTV 1.4	BSTV 1.5	BSTV 1.6	BSTV 2.1	BSTV 2.2			
...		PDM 9	1	A 9.1													
					BSTV 1.1	BSTV 1.2	BSTV 1.3	BSTV 1.4	BSTV 1.5	BSTV 1.6	BSTV 2.1	BSTV 2.2			
														

Legende:

BF: Bauteilfamilie BSTV: Bauteilstrukturvariante A: Ausprägung PDM: Produktmerkmal
 GEM: Geometrisches Merkmal TEM: Technologisches Merkmal ORM: Organisatorisches Merkmal

Abbildung 30: Merkmalsbasierte Bauteilfamilienstrukturmatrix aufbauend auf NEUHAUSEN (2001)

5.1.2 Prozessmodell

Das entwickelte Prozessmodell beinhaltet die standardisierte Deskription von Vorgängen innerhalb einer Fertigungszelle und ermöglicht damit deren Verknüpfung mit dem Produkt- und Ressourcenmodell. Im Nachfolgenden sind dazu die technologischen (Abschnitt 5.1.2.1) und steuerungstechnischen (Abschnitt 5.1.2.2) Prozesse innerhalb einer Fertigungszelle beschrieben.

5.1.2.1 Technologische Prozessbeschreibung

In der Produktion dient eine technische Arbeitsvorgangsfolge bzw. Prozesskette zur Abbildung der Reihenfolge von Arbeitsvorgängen, die ein Bauteil für dessen Herstellung durchläuft. Über den Zusammenhang zwischen Produkt- und Prozessmodell lassen sich demnach im PPR-Datenmodell (vgl. Abschnitt 5.1) erforderliche Prozesse entsprechend der bauteilspezifischen Anforderungen ableiten und in eine Vorgänger- und Nachfolgerbeziehung überführen, wobei zwischen technologieutralen und -spezifischen Prozessen differenziert wird.

Zur Charakterisierung der **technologieutralen Ablaufbeschreibung** und den werkstückspezifischen Anforderungen für die zu fertigenden Bauteile mit deren Merkmalen dient eine Prozess-Feature-basierte Deskription. Dazu sind anhand der

Form-Feature-basierten Produktbeschreibung (vgl. Abschnitt 5.1.1) die für die Produktherstellung erforderlichen Wertschöpfungsschritte (WS) mit Vorgänger- und Nachfolgerbeziehung (Abbildung 31) abzuleiten. Die Wertschöpfungsschritte sind dabei in Anlehnung an VDI 2803 als Funktionen zu verstehen, die durch eine oder mehrere kombinierte Technologien realisiert werden. Um die Zuordnung von Technologien zu einzelnen Wertschöpfungsschritten zu ermöglichen, werden die Wertschöpfungsschritte technologieunabhängig durch eine Substantiv-Verb-Kombination als Prozess-Features beschrieben. Somit lassen sich beispielsweise dem Wertschöpfungsschritt „Blech trennen“ die technologiespezifischen Produktionsprozesse „Laserschneiden“, „Bandsägen“ oder „Wasserstrahlschneiden“ zuordnen.

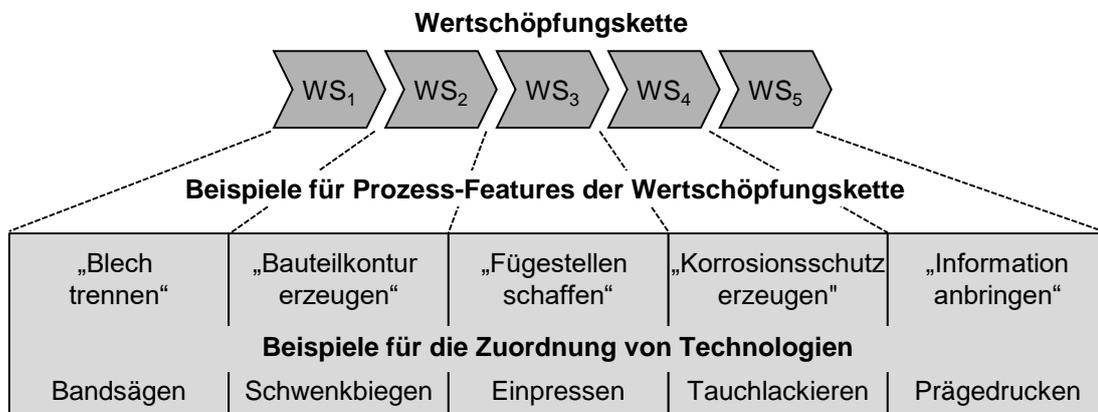


Abbildung 31: *Technologieneutrale Prozessbeschreibung zur Zuordnung alternativer Technologien in Anlehnung an SCHINDLER (2015)*

Als Basis für die standardisierte Deskription von **technologiespezifischen Produktionsprozessen** in Fertigungszellen dienen, wie bereits in zahlreichen Vorarbeiten (vgl. Abschnitt 3.3), anerkannte Normen und Richtlinien. Demnach sind die Produktionsprozesse nachfolgend mithilfe eines fähigkeitsbasierten Klassifizierungsschemas definiert. Den Fähigkeiten (vgl. Abschnitt 2.3.3) lassen sich für deren weitere Spezifizierung wiederum Merkmale zuordnen, wodurch produkt- bzw. prozessspezifische Anforderungen mit den Ressourceneigenschaften abgleichbar (vgl. Abschnitt 5.2.2) sind. Die Merkmale sind in den entsprechenden Partialmodellen Produkt (vgl. Abschnitt 5.1.1) und Ressource (vgl. Abschnitt 5.1.3.2) erläutert.

Die **Fähigkeiten** unterteilen sich gemäß der Taxonomie (Abbildung 32) in oberster Ebene (Klasse) anhand der Grundoperationen Fertigen (vgl. DIN 8580), Handhaben (vgl. VDI 2860), Kontrollieren (vgl. VDI 2860) und Sonderoperationen.

Diese lassen sich entsprechend den weiteren Ebenen als spezifische Operationen weiter detaillieren. So lässt sich exemplarisch die Operation „Plansenken“ hierarchisch ausgehend von der Grundoperation „Fertigen“ über eine der sechs Hauptgruppen bis auf unterste Ebene bestimmen.

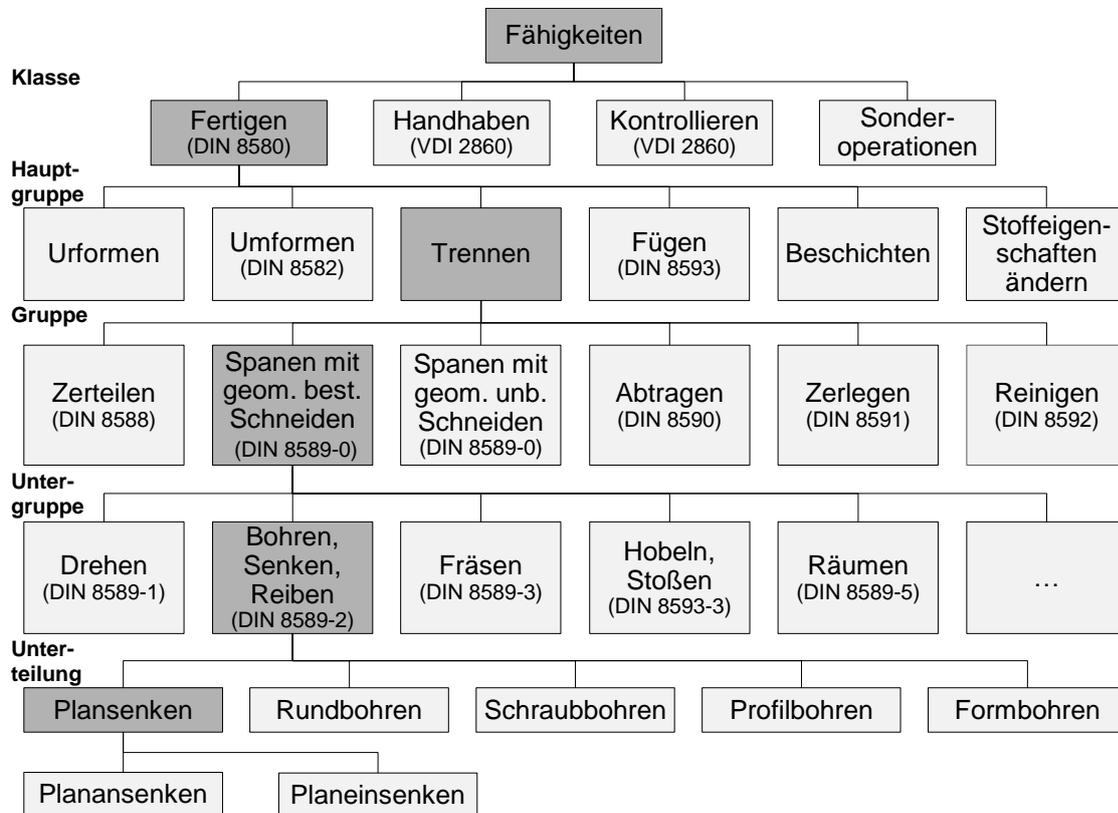


Abbildung 32: Fähigkeitsbasierte Klassifizierung von Produktionsprozessen am Beispiel „Plansenken“ in Anlehnung an DIN 8589-2

Neben direkt wertschöpfenden Operationen (z. B. Plansenken) sind nicht direkt wertschöpfende Vorgänge (z. B. Handhabungs-, Kontrollprozesse) in der Fertigungszelle zu berücksichtigen. Diese Vorgänge übernehmen in der Regel erforderliche Unterstützungsaufgaben bei der Leistungserstellung. Analog zu den Fertigungsverfahren sind Handhabungsprozesse (Abbildung 33) gemäß der VDI 2860 in fünf Hauptgruppen gegliedert. Entsprechend kann exemplarisch die Operation „geordnetes Speichern“ als ein Vorgang des Handhabens bestimmt werden. Für eine Übersicht zu Sonderoperationen sei zum Beispiel auf die Facharbeit von LOTTER (2012) verwiesen.

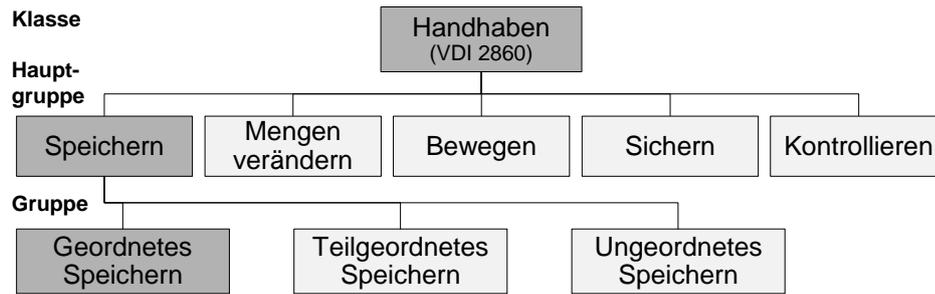


Abbildung 33: Fähigkeitsbasierte Klassifizierung der Handhabungsprozesse am Beispiel „geordnetes Speichern“ aufbauend auf VDI 2860

Durch eine Aneinanderreihung von Fähigkeiten mit Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen kann eine fähigkeitsbasierte Abbildung von **Prozessfolgen** vorgenommen werden. Zur Modellierung von diskreten Prozessen bzw. Prozessfolgen gibt es in der Literatur eine Vielzahl von Ansätzen (vgl. MÖHRLE 1989, FELDMANN 1997). Ein in der Produktionstechnik weit verbreitetes und zur Abbildung von individuellen Prozessketten geeignetes Verfahren stellen Petri-Netze dar (MÖHRLE 1989, FELDMANN 1997, OSTGATHE 2012). Damit lassen sich sowohl nebenläufigen Vorgänge als auch dynamische Zustände abbilden (PETRI 1962, FELDMANN 1997, OSTGATHE 2012). Petri-Netze sind eine spezielle Art eines gerichteten Graphen, der in der Grundausführung über Stellen, Transitionen, Kanten und Marken charakterisiert ist (vgl. z. B. PETRI 1962, ABEL 1990, PRIESE & WIMMEL 2008).

Bei der Petri-Netz-bezogenen Darstellung (Abbildung 34) fähigkeitsbasierter Prozessfolgen im Prozessmodell repräsentieren Kreise die Stellen, Rechtecke die Transitionen, Pfeile die Kanten und Punkte die Marken. Die Stellen bzw. Zustände als passive Komponenten besitzen die Kapazität eins (Anzahl an Marken an, die eine Stelle aufnehmen) und drücken gemeinsam mit den Marken (Werkstück) den aktuellen Zustand einer Marke aus, welches sich entsprechend der Vorgangsrichtung der Kanten zwischen den Transitionen bewegt und von einem Ausgangszustand in einen Folgezustand überführt wird. Transitionen stellen dabei die aktiven Komponenten in Form von Fähigkeiten dar und sind aktiviert, wenn eine unmittelbar vorangestellte Stelle mit einer Marke besetzt ist.

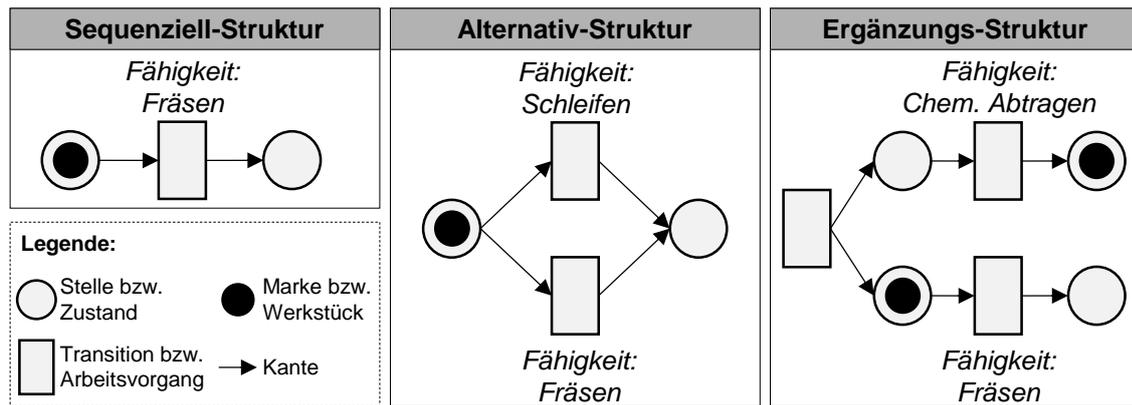


Abbildung 34: Strukturen zur Modellierung von technologischen Prozessfolgen mittels Petri-Netz in Anlehnung an OSTGATHE (2012)

Ebenso sind zeitliche und kausale Zusammenhänge der Prozessschritte über drei grundlegende Ordnungsbeziehungen in Anlehnung an ALTMANN (1991), BECKENDORFF (1991) und OSTGATHE (2012) definiert. Neben der Sequenziell-Struktur, bei der Arbeitsvorgänge nacheinander angeordnet sind, sind Ergänzungs- und Alternativ-Strukturen möglich. Während mit einer Ergänzungs-Struktur parallel ablaufende und voneinander unabhängige Vorgänge abgebildet werden, stellt eine Alternativ-Struktur alternierende Arbeitsvorgänge dar, die zum gleichen Ergebnis führen.

5.1.2.2 Steuerungstechnische Prozessbeschreibung

Neben den technologischen Prozessen sind im CPPS-Kontext auch die steuerungstechnischen Prozesse zu betrachten. Zur Umsetzung CPPS-spezifischer Anwendungen (vgl. Abschnitt 2.2.2 und 5.1.3.1) bedarf es daher geeigneter Schritte, um die steuerungsspezifischen Aufgaben im Kommunikations- und Steuerungssystem zu definieren, die sich aus der Erfassung, Speicherung, Auswertung und Interpretation von Daten ergeben. Im Multi-Agenten-Systems eines CPPS-Netzwerks (vgl. Abschnitt 2.2.3) finden dazu Interaktionen zwischen den einzelnen Systemelementen statt. Ein geeignetes Verfahren zur multi-agentenbasierten Verhaltensmodellierung des Steuerungsablaufs stellt das Sequenzdiagramm dar (vgl. z. B. THEISS 2015, FISCHER ET AL. 2017, PANTFÖRDER ET AL. 2017).

Nach RUMPE (2017), ALT (2012) und BALZERT (2005) ermöglicht das Sequenzdiagramm (Abbildung 35) die graphische Abbildung des Kommunikationsablaufs zwischen Systemelementen bzw. Objekten einschließlich deren agentenspezifischen Verhaltens im **Steuerungsablauf**. Dabei repräsentieren vertikale Linien den

zeitlichen Ablauf jedes einzelnen Objektes, Pfeile den Austausch von synchronen und asynchronen Nachrichten sowie Aktivierungsbalken die aktive Teilnahme eines Objektes an der Interaktion. Im Gegensatz zu synchronen blockieren asynchrone Nachrichten nicht den zeitlichen Ablauf, um eine Antwort zu erhalten. Zudem sind die Aktivierungsbalken anhand objektspezifischer Steuerungsaufgaben charakterisierbar, womit sich neben der Kommunikationsfähigkeit die weiteren nachfolgend beschriebenen intelligenten Funktionen für jedes Objekt ableiten lassen.

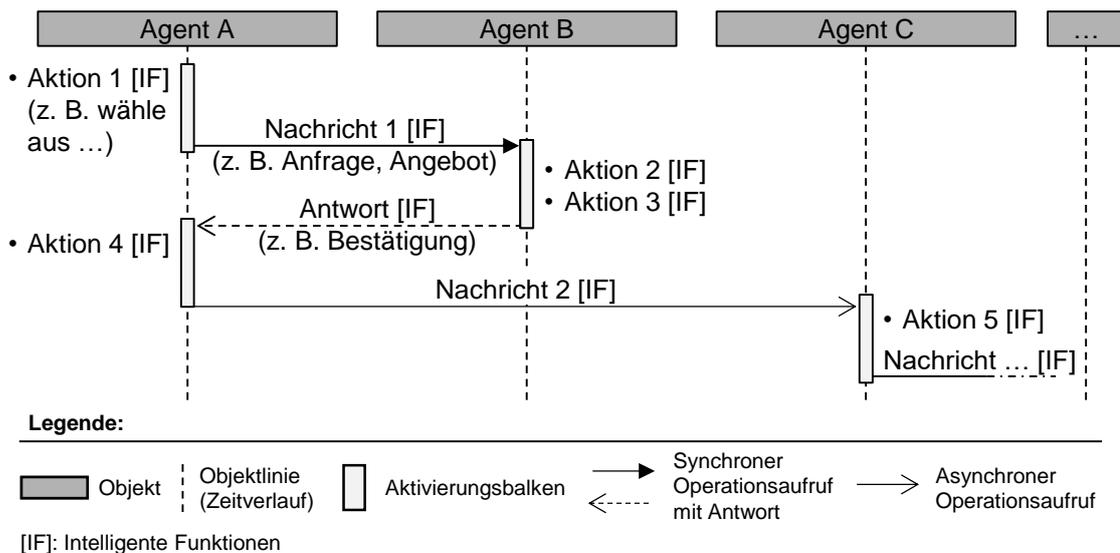


Abbildung 35: Sequenzdiagramm zur Modellierung des Verhaltens und des Kommunikationsablaufs von Agenten in einem Multiagentensystem aufbauend auf THEISS (2015) und FISCHER ET AL. (2017)

Intelligente bzw. digitale Funktionen dienen zur Umsetzung CPPS-spezifischer Anwendungen (vgl. Abschnitt 2.2.2 und 5.1.3.1) und werden direkt am Objekt mit IuK-Technologien (vgl. Abschnitt 2.2.4) oder indirekt über deren digitale Repräsentanten (vgl. Abschnitt 2.2.3) realisiert. Aufbauend auf NOCHTA (2008), SÁNCHEZ LÓPEZ ET AL. (2011), DEINDL (2013) und LEWIN & FAY (2018) sind sieben intelligente Grundfunktionen (Tabelle 2) definiert. Die Funktion Identifikationsfähigkeit stellt dabei eine obligatorische Voraussetzung für ein intelligentes Objekt dar. Daneben sind die Funktionen Lokalisierbarkeit, Speicherung von Objektinformationen, Monitoring, Kommunikationsfähigkeit, automatische Informationsableitung und selbstständige Entscheidungsfindung optional je nach CPPS-spezifischer Anwendung erforderlich. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass sich intelligente Funktionen gegenseitig bedingen können. So stellt zum Beispiel die Identifikationsfähigkeit eine Voraussetzung für die Kommunikationsfähigkeit dar.

Tabelle 2: *Deskription intelligenter Funktionen in Anlehnung an (NOCHTA 2008, SÁNCHEZ LÓPEZ ET AL. 2011, DEINDL 2013, LEWIN & FAY 2018)*

Abk.	Intelligente Funktion	Beschreibung
ID	Identifikationsfähigkeit	Die Funktion Identifikationsfähigkeit ermöglicht die eindeutige Identifikation eines Objektes.
LO	Lokalisierbarkeit	Die Lokalisierbarkeit determiniert den Aufenthaltsort für ein mobiles Objekt.
OI	Speicherfähigkeit Objektinformationen	Die Funktion Speicherung zusätzlicher Objektinformationen charakterisiert spezifische Objektinformationen, die über die Identität und den Standort hinausgehen.
MO	Monitoring / Überwachungsfähigkeit	Das Monitoring umfasst die eigenständige Erfassung und Sammlung von Informationen sowie dynamisch veränderbarer Parameter zur Bestimmung des Objektzustandes bzw. dessen Umgebung.
KO	Kommunikationsfähigkeit	Mit der Kommunikationsfähigkeit wird der Informationsaustausch eines Objektes mit dessen Umwelt beschrieben.
IA	Automatische Informationsableitung / Transaktion	Die Informationsableitung befähigt ein Objekt zur Verarbeitung von Abfragen mittels einfacher Operationen zur automatischen Reaktion bei Eintritt bestimmter Ereignisse.
SE	Selbstständige Entscheidungsfähigkeit	Die selbstständige Entscheidungsfähigkeit charakterisiert die autonome Ausführung von Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung.

5.1.3 Ressourcenmodell

Das entwickelte Ressourcenmodell dient als essentielle Grundlage für die Gestaltung alternativer Fertigungszellkonfigurationen. Es beschreibt generisch den strukturellen Aufbau und die spezifischen Eigenschaften modularer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen. Im Folgenden wird zunächst auf Systemebene die Fertigungszellstruktur (Abschnitt 5.1.3.1) dargelegt, bevor auf Objektebene auf die Betriebsmittelstruktur (Abschnitt 5.1.3.2) eingegangen wird.

5.1.3.1 Fertigungszellstruktur

Fertigungszellen als Bestandteile eines CPPS-basierten Fertigungssystems (vgl. Abschnitt 2.2.2) sind in die vorherrschende Steuerungs- und Kommunikationsstruktur (vgl. Abschnitt 2.2.3) mit „Plug & Produce“-Modulen und anpassbaren Automatisierungsgrad (vgl. Abschnitt 2.2.5) integrierbar. Das schematische Strukturmodell (Abbildung 36) charakterisiert den strukturellen Aufbau und die steuerungstechnischen Randbedingungen modularer Fertigungszellen.

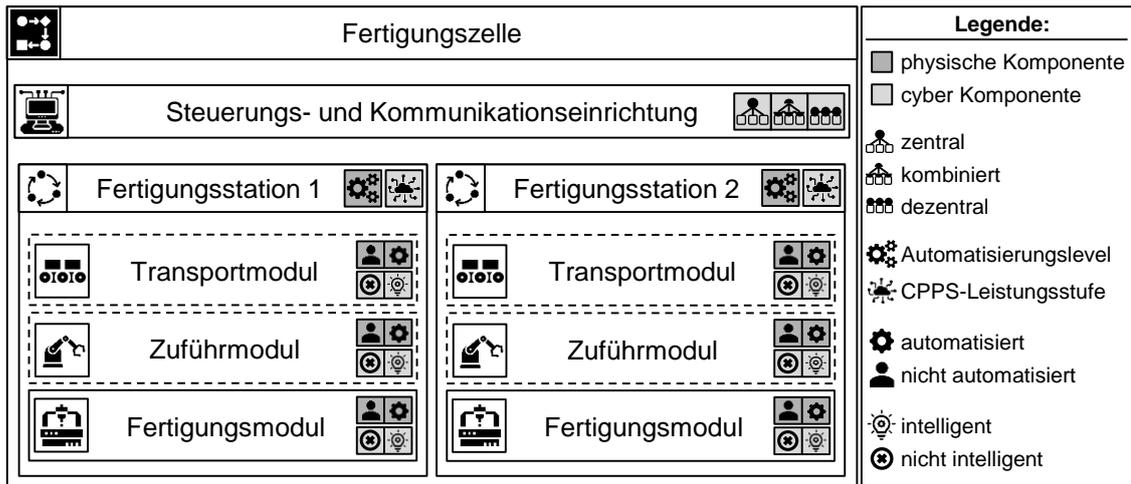


Abbildung 36: Modular hierarchische Aufbaustruktur einer Fertigungszelle in CPPS-Strukturen am Beispiel mit zwei Fertigungsstationen

Die **Fertigungszellstruktur** besteht aus einer oder mehreren Fertigungsstationen (Basismodul), die sich wiederum aus funktional unabhängigen Stationsmodulen zusammensetzen (vgl. Abschnitt 2.1.1). Die prozessbezogenen Stationsmodule führen die Prozesse (vgl. Abschnitt 5.1.2) zur Herstellung der Werkstücke aus und können CPPS-spezifische Steuerungsfunktionen in Form automatisierungs- und intelligenzbezogener Eigenschaften aufweisen. Für deren Ausführung besitzt die Fertigungszelle eine Steuerungs- und Kommunikationseinrichtung, die in das übergreifende CPPS-Netzwerk (vgl. Abschnitt 2.2.3) des Fertigungssystems eingebunden werden kann. Somit wird anhand des modularen Aufbaus und der CPPS-basierten Steuerungsanbindung die Struktur-, Hard- oder Software-bezogene Konfiguration einzelner Elemente bzw. Teilsysteme in der Fertigungszelle maßgeblich gewährleistet (vgl. Abschnitt 2.2.5). Im Nachfolgenden wird detailliert auf die konfigurationspezifischen Bestandteile eingegangen.

Bei den Stationen wird in Anlehnung an HÖRAUF (2019) und STÄHR (2020) zwischen den **Modultypen** Basis-, Fertigungs-, Transport- und Zuführmodul unterschieden. Das Basismodul stellt das Fundament einer Station dar und definiert die technischen Randbedingungen, wie beispielsweise standardisierte Schnittstellen für Energie- und Medienübertragung sowie grundlegende Kommunikations- und Steuerungstechnik (vgl. z. B. DRABOW 2006, KLUGE 2011, SCHENK ET AL. 2014), für die prozessspezifischen Fertigungs-, Zuführ- und Transportmodule. Während Fertigungsmodule jene Module mit direkten Beitrag zur Wertschöpfung repräsentieren, beziehen sich Transportmodule auf die Werkstückbeförderung und Zuführmodule auf Handlingsaufgaben. Die eigentliche Ausführung der prozessspezifischen Stationsmodule ist über Betriebsmittel (vgl. Abschnitt 5.1.3.2) realisiert.

Modellbasierte Deskription und Konfiguration

Der Mensch wird dabei nicht separat als einzuplanende Ressource betrachtet, da dieser zu dessen Arbeitsausführung Betriebsmittel nutzt.

Zentral für den konfigurationsabhängigen Aufbau modularer Fertigungszellen im CPPS-Kontext sind die **steuerungstechnischen Randbedingungen**, wobei neben der Automatisierung von physischen Tätigkeiten und auch die Informationsautomatisierung von besonderer Relevanz ist (vgl. Abschnitt 2.2.5). Die Charakterisierung der Basis- und Stationsmodule (Tabelle 3) hinsichtlich deren steuerungstechnischen Randbedingungen ist anhand der nachfolgend beschriebenen Kriterien mit unterschiedlichen Ausprägungen geprägt. Während das stationsspezifische Basismodul mithilfe der Automatisierungs- und CPPS-Leistungsstufe definiert ist, werden die prozessspezifischen Stationsmodule entsprechend durch die Kriterien des Automatisierungs- und Intelligenzprofils determiniert.

Tabelle 3: Charakterisierung von Basis- und Stationsmodul

Ebene	Kriterien	Ausprägungen				
Basismodul	Automatisierungsleistungsstufe (AL)	Nicht automatisiert (NA)		Assistiert automatisiert (AA)		Automatisiert (AU)
	CPPS-Leistungsstufe (CPPS-L)	Keine CPPS-Einbindung (KC)	Datenbereitstellung (DB)	Datenanalyse (DA)	Dateninterpretation (DI)	Selbstkonfiguration (SK)
Stationsmodul	Automatisierungsprofil (AP)	Nicht automatisiert			Automatisiert	
	Intelligenzprofil (IP)	Nicht intelligent			Intelligent	

Abgeleitet aus den Automatisierungsausbaustufen von WESTERMANN (2017), KLUGE (2011), FROHM ET AL. (2008) und BURMANN (1983) sind die drei **Automatisierungsstufen** nicht automatisiert, assistiert automatisiert und automatisiert in Hinblick auf physische Tätigkeiten (vgl. Abschnitt 2.2.5) definiert. Bei einem *nicht automatisierten Basismodul* werden die Produktionsprozesse durch den Menschen mit Unterstützung von Handwerkzeugen oder ferngesteuerten Anlagen ausgeführt. Entsprechend ist auch keine bzw. kaum Steuerungstechnik für die Automatisierung vorhanden. Deshalb sind diesem Basismodul keine automatisierten Fertigungs-, Transport- und Zuführungsmodule zuordenbar. Ein *assistiert automatisiertes Basismodul* ermöglicht dagegen die Kombination von nicht automatisierten mit automatisierten Modulen, wodurch sowohl manuelle als auch automatisierte Vorgänge durch die Zusammenarbeit von Mensch und automatisierter Ma-

schine stattfinden. Entsprechend bedarf es die automatisierten Module steuerungstechnisch einzubinden. Mit einem *automatisierten Basismodul* wird darüber hinaus die umfängliche Automatisierung der Produktionsprozesse charakterisiert. Folglich lassen sich jenem Basismodul nur automatisierte Module zuweisen.

Neben den Automatisierungsstufen kann beim Basismodul zwischen **CPPS-Leistungsstufen** in Hinblick auf die Informationsautomatisierung (vgl. Abschnitt 2.2.5) differenziert werden. Werden keine CPPS-spezifischen Anwendungen umgesetzt, sind dem Basismodul die erste CPPS-Leistungsstufe *keine CPPS-Einbindung* und nicht intelligente Stationsmodule zuweisbar. Erfolgt jedoch die Umsetzung CPPS-spezifischer Anwendungen im CPPS-Netzwerk (vgl. Abschnitt 2.2.3) wird in Anlehnung an BÖSE (2012), LEE ET AL. (2015) (vgl. Abschnitt 2.2.2) und WESTERMANN (2017) zwischen vier weiteren CPPS-Leistungsstufen (Tabelle 4) differenziert, wobei je nach Bedarf intelligente wie auch nicht intelligente Stationsmodule dem Basismodul zuordenbar sind.

Tabelle 4: Beispiele für CPPS-spezifische Anwendungen abhängig von CPPS-Leistungsstufe

CPPS-Leistungsstufen	CPPS-spezifische Anwendungen
Datenbereitstellung	Zustandserfassung
Datenanalyse	Zustandsdiagnose und -prognose, Bauteilverfolgung
Dateninterpretation	Empfehlungen zur Prozessoptimierung und -stabilisierung, Produktqualitätsbeurteilung
Selbstkonfiguration	Selbstadaptierende Anlagen und -komponenten, autonome Störungsbehandlung

In der zweiten Stufe *Datenbereitstellung* findet die Erfassung physikalischer Größen intelligenter Objekte (Systemelemente) bzw. deren Umgebung statt, wohingegen die dritte Stufe zum Bereitstellen und Abrufen von Informationen durch die *Analyse* von aktuellen und historischen Daten dient. Werden darüber hinaus die Daten interpretiert, diese mit weiteren Informationen angereichert und Handlungsempfehlungen bezüglich eines zielkonformes Systemverhaltens für den Entscheider abgeleitet, liegt die vierte Stufe *Dateninterpretation* vor. Mit der fünften Stufe *Selbstkonfiguration* werden dagegen situationsspezifische Aufgaben vom System bzw. dessen Elementen eigenständig gelöst (vgl. Abschnitt 2.2.4), indem diese die

präventiven und korrigierenden Handlungsempfehlungen aus der vorherigen Stufe autonom hinsichtlich der Zielstellung ausführen.

Zur Umsetzung CPPS-spezifischer Anwendungen bedarf es die steuerungstechnischen Randbedingungen auf Systemebene bezüglich der CPPS-relevanten Einbindung intelligenter Objekte, in Gestalt von Produkten (vgl. Abschnitt 5.1.1) und Betriebsmitteln (vgl. Abschnitt 5.1.3.2), zu definieren. Aufbauend auf den Ansätzen von WINDT (2008), BÖSE (2012) und DEINDL (2013) ist daher die **Steuerungs- und Kommunikationseinrichtung** anhand von Kriterien und deren Ausprägungen konkretisiert. Die Charakterisierung (Tabelle 5) umfasst die Art der Steuerungsstruktur sowie den Ort der Informationsverarbeitung und Datenhaltung. Grundsätzlich kann, wie nachfolgend dargelegt, deren Ausführung zentral auf Systemebene, dezentral am Objekt oder kombiniert erfolgen.

Tabelle 5: Charakterisierung Steuerungs- und Kommunikationseinrichtung

Kriterien	Ausprägungen		
Art der Steuerungsstruktur (SS)	zentral, hierarchisch (Z)	kombiniert (K)	dezentral, heterarchisch (D)
Ort der Informationsverarbeitung (IV)	zentral (Z)	kombiniert (K)	dezentral (D)
Ort der Datenhaltung (DH)	zentral (Z)	kombiniert (K)	dezentral (D)

Die *Art der Steuerungsstruktur* (vgl. Abschnitt 2.2.3) regelt abhängig vom übergeordneten Gesamtziel die Koordination bzw. gegenseitige Abstimmung der einzelnen Systemelemente (BÖSE 2012, DEINDL 2013). Dabei wird zwischen einer hierarchischen, heterarchischen oder kombinierten Struktur unterschieden (vgl. SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007, WINDT 2008, BÖSE 2012, DEINDL 2013, PHILIPP 2014). Hierarchische Strukturen dienen zur zentralen Steuerung von Prozessen auf Systemebene (z. B. fremdgesteuerte Systeme) und nutzen intelligente Objekte vorrangig für diagnostische Zwecke (z. B. Tracking, Zustandsüberwachung) (BÖSE 2012, DEINDL 2013). Dagegen erfolgt bei heterarchischen Strukturen (z. B. selbststeuernde Systeme) eine gemeinsame Entscheidungsfindung dezentral auf Systemelementebene, weshalb intelligente Objekte einen hohen Grad an Selbststeuerung (vgl. Abschnitt 2.2.4) aufweisen (BÖSE 2012, DEINDL 2013). Eine Mischform stellt die kombinierte Struktur dar.

In engen Zusammenhang mit der Art der Steuerungsstruktur steht der *Ort der Informationsverarbeitung*. Entsprechend ist die Informationsverarbeitung zentral im Netzwerk, dezentral im Objekt selbst oder bei beiden (kombiniert) verortet (vgl. WINDT 2008, BÖSE 2012, DEINDL 2013, PHILIPP 2014). Ebenso werden durch intelligente Objekte große Datenmengen dezentral an den Entstehungsorten erfasst sowie dezentral an den Orten des Handelns gebraucht (DEINDL 2013). Demnach wird mit dem *Ort der Datenhaltung* festgelegt, ob die Datenhaltung zentral im Netzwerk, dezentral am Objekt oder kombiniert stattfindet (vgl. WINDT 2008, BÖSE 2012, DEINDL 2013, PHILIPP 2014).

5.1.3.2 Betriebsmittelstruktur

Arbeitsstationen bzw. deren prozessspezifische Stationsmodule sind durch Betriebsmittel realisiert. Bei der Zuordnung der Betriebsmittel zu diesen Modulen gilt es deren Eignung hinsichtlich der technologischen und steuerungstechnischen Anforderungen zu prüfen. Der strukturelle Aufbau und die Eigenschaften von Betriebsmitteln werden daher mithilfe des Betriebsmittelmodells charakterisiert.

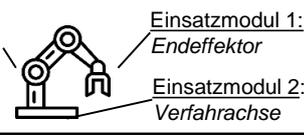
Der Aufbau eines Betriebsmittels (BM) kann aus einer Einheit oder zusammengesetzten „Plug & Produce“-fähigen Modulen (vgl. Abschnitt 2.1.4) bestehen. Um eine modulare **Betriebsmittelkonfiguration** (BMK) (z. B. verfahrbarer Handhabungsroboter) zu charakterisieren, sind dieser in Anlehnung an DRABOW (2006), KLUGE (2011) und HEES (2017) ein Basismodul (z. B. Knickarmroboter) und austauschbare Einsatzmodule (z. B. Endeffektor, Verfahrachse) zugewiesen. Für die strukturierte Darstellung der relevanten Informationen einzelner Einsatzmodule sowie einer Betriebsmittelkonfiguration dienen Betriebsmittel- bzw. Komponentensteckbriefe.

Der Steckbrief einer Betriebsmittelkonfiguration (Abbildung 37) setzt sich aus den Steckbriefen der zugehörigen Einzelmodule zusammen. Die Steckbriefe beinhalten, neben allgemeinen Angaben, einer Kurzbeschreibung und sonstigen Informationen, die für den Eignungsabgleich (vgl. Abschnitt 2.3.3 und 5.2.3) relevanten Eigenschaften der Betriebsmittel und Einsatzmodule. Grundlage hierfür bilden, wie nachfolgend ausgeführt, sowohl eine fähigkeits- und merkmalsbasierte Beschreibung zu den technologischen Eigenschaften als auch die steuerungstechnischen Eigenschaften, wie automatisierungs- und intelligenzbezogene Informationen. Ebenso sind technische Schnittstellen für z. B. Medienversorgung oder IT-Anbindung spezifizierbar.

Betriebsmittelsteckbrief – Betriebsmittelbezeichnung

Abbildung

Basismodul:
Knickarmroboter



Einsatzmodul 1:
Endeffektor

Einsatzmodul 2:
Verfahrachse

Allgemeine Daten

Allgemeine Angaben zu Hersteller, Modell, Baujahr, Betriebsmitteltyp usw.

Strukturbezogene Informationen

Kombiniertes Betriebsmittel

```

graph TD
    KB[Kombiniertes Betriebsmittel] --- B[Basismodul]
    KB --- E1[Einsatzmodul 1]
    KB --- E2[Einsatzmodul 2]
    KB --- D[...]
            
```

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Funktion und des Anwendungszwecks des Betriebsmittels

Automatisierungsbez. Informationen

Werkzeugwechsel Nicht automatisiert
 Grundlegend automatisiert
 Programmwechsel Erweitert automatisiert
 Hoch- / vollautomatisiert

Intelligenzbezogene Informationen

Identifikator Sensorik
 Kommunikationsschnittstelle Aktorik
 Informationsspeicherung Energieversorgung
 Informationsverarbeitung

Fähigkeits- und merkmalsbasierte Informationen

Betriebsmittelbezeichnung	Fähigkeiten		Prozessmerkmale (PZM)											
	Grundoperationen	Spezifische Operationen	Geometrisch			Technologisch			Wirtschaftlich-Organisat.					
			PZM	A	EI	PZM	A	EI	PZM	A	EI			
<i>Kombiniertes Betriebsmittel</i>	<i>Fähigkeiten</i>	<i>Fähigkeiten</i>												

Sonstige Informationen

Angaben zu sonstigen Informationen bzw. Quellenangabe etc.

Legende:

PZM: Prozessmerkmal A: Ausprägung EI: Einheit

Abbildung 37: Struktureller Aufbau des Betriebsmittelsteckbriefs

Zur Beschreibung der **technologischen Eigenschaften** sind die ausführbaren Prozesse von Betriebsmitteln generisch anhand den Taxonomien im Prozessmodell (vgl. Abschnitt 5.1.2.1) charakterisiert. Entsprechend lassen sich Betriebsmittel einem Betriebsmitteltyp (z. B. Fertigungs-, Handhabungsmittel) zuordnen und deren prozessspezifischen Eigenschaften anhand von **Fähigkeiten** bis auf Werkzeugebene beschreiben. Für die weitere Spezifizierung der Betriebsmittel sind den Fähigkeiten, analog zu den Produktmerkmalen im Produktmodell (vgl. Abschnitt 5.1.1), Prozess- bzw. Ressourcenmerkmale mit entsprechenden Ausprägungen und Werten zuweisbar.

Aufbauend auf den Arbeiten von TROMMER (2001), MORYSON (2004), KNOCH (2005), KLUGE (2011), OSTGATHE (2012) und MICHNIEWICZ (2019) sind mögliche **Prozess- bzw. Ressourcenmerkmale** nach geometrischen, technologischen und organisatorischen Informationen kategorisiert:

- *Geometrisch*: Arbeitsraum, Werkstückaufnahme für handhabbare Bauteilgeometrien (z. B. Länge, Durchmesser) und -formen (z. B. rotationssymmetrisch) usw.
- *Technologisch*: handhabbare Werkstückkennwerte (Werkstoffart und deren Eigenschaften, Gewicht, Oberflächen), Leistungskennwerte (z. B. Zerspanrate, Prozesstemperatur), Toleranzen (z. B. Positionier- und Wiederholgenauigkeit, Bearbeitungsgenauigkeit) usw.
- *Organisatorisch*: Identifikationsnummer (ID), Flächenbedarf, Personalbedarf, Wartungszustand, Kapazität (z. B. Losgrößeneignung, Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Ausschuss), Kosten (z. B. Anschaffungs-, Stromkosten), Nutzungsdauer usw.

Für eine Übersicht zu weiteren Prozess- bzw. Ressourcenmerkmalen sei auf die Literatur (vgl. z. B. MORYSON 2004, KLUGE 2011) verwiesen. Zudem sind bei einer zusammengesetzten Betriebsmittelkonfiguration wechselwirkende und unabhängige Merkmale mit deren Ausprägungen zu berücksichtigen. Beispielhaft lässt sich dies in Anlehnung an MICHNIEWICZ (2019) an einem Handhabungsroboter (Abbildung 38), bestehend aus einem Knickarmroboter (Basismodul) und Endeffektor (Einsatzmodul), veranschaulichen. Dabei zeigt sich, dass die maximale Traglast der kombinierten Betriebsmittelkonfiguration gegenüber den modulspezifischen Traglasten niedriger ist.

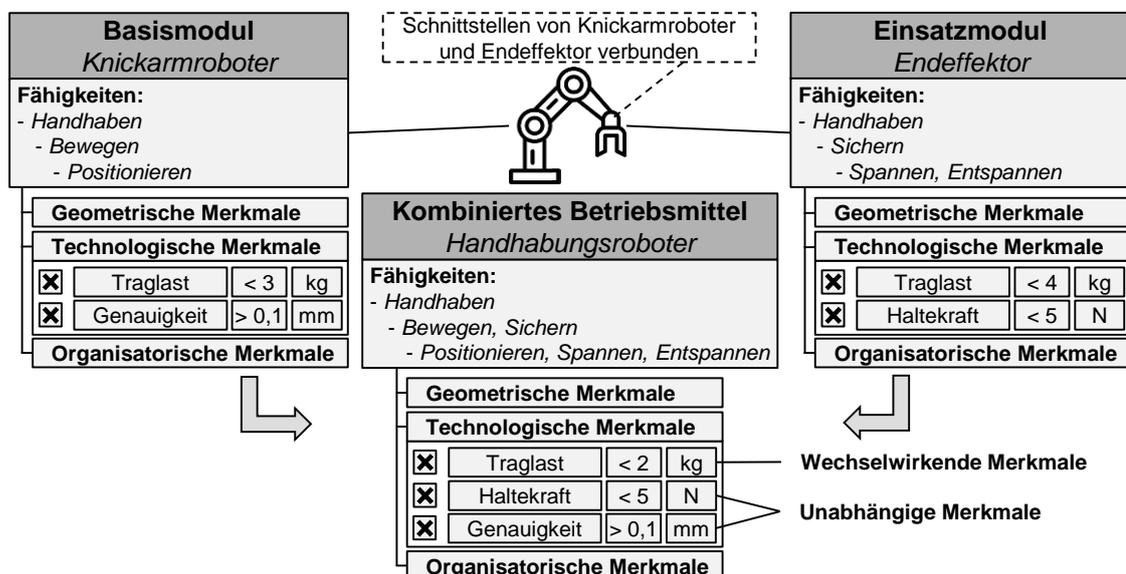


Abbildung 38: Betriebsmittelkonfiguration am Beispiel eines Handhabungsroboters in Anlehnung an MICHNIEWICZ (2019)

Neben den technologischen Charakteristika sind die **steuerungstechnischen Eigenschaften** in Form automatisierungs- und intelligenzbezogener Informationen relevant. Die Einteilung von Betriebsmitteln nach deren **Automatisierungseigenschaften** hängt primär von der Notwendigkeit des menschlichen Eingriffs zur Durchführung kognitiver Aufgaben ab (vgl. Abschnitt 2.2.1). Neben der eigentlichen Prozessausführung stehen vor allem Umrüstvorgänge im Fokus, um erforderliche Werkzeug- bzw. Programmwechsel durchzuführen. Aufbauend auf den Stufen des Systemverhaltens (vgl. Abschnitt 2.2.4) und in Anlehnung an DUMITRESCU ET AL. (2018a, 2018b) und BEHRENS ET AL. (2018) wird zwischen vier Automatisierungsstufen (AS) differenziert, wobei eine Vernetzung des Betriebsmittels mit dessen Umgebung ab der höchsten Stufe zwingend vorausgesetzt wird:

- *Nicht automatisiert (NA), ferngesteuert*: Das Betriebsmittel wird permanent vom Menschen bedient, weshalb keine Automatisierung vorliegt. Dies deckt somit alle manuellen (Muskelkraft), teil- (Handwerkzeuge) und vollmechanisierten (konventionelle Anlagen) Arbeitsschritte ab.
- *Grundlegend automatisiert (GA), programmiert*: Das Betriebsmittel setzt programmierte Handlungsabläufe für definierte Situationen selbstständig um, sobald diese z. B. durch Signale oder Schwellwerte aktiviert werden. Bei nicht programmierten Situationen bedarf es des menschlichen Eingriffs.
- *Erweitert automatisiert (EA), regelbasiert*: Das Betriebsmittel greift eigenständig auf Verhaltensmuster zurück, um regelbasiert eine geeignete Handlungsalternative für die situationsspezifische Zielerreichung auszuwählen. Dazu werden die Verhaltensmuster in einer Lernphase antrainiert und vor Inbetriebnahme in einer Wissensbasis abgelegt. Situationen jenseits des Erlernten erfordern allerdings das menschliche Eingreifen.
- *Hoch- und vollautomatisiert (H/VA), selbstlernend*: Das Betriebsmittel ist mit der Umgebung vernetzt, weist eine Selbstlernfunktionalität auf und erweitert dessen Wissensbasis, auch im laufenden Betrieb, kontinuierlich um neue Handlungsalternativen. Aus dem gelernten Wissen leitet es selbstständig und situationsspezifisch Handlungen ab und führt diese aus. Die Kontrollabgabe an den Menschen erfolgt dabei abhängig von der inhärenten Intelligenz nur in komplexen Situationen oder Ausnahmefällen.

Im Hinblick auf **intelligenzbezogene Aspekte** lassen sich Betriebsmittel, wie auch Produkte (vgl. Abschnitt 5.1.1), mit IuK-Technologien (vgl. Abschnitt 2.2.4) ausstatten, um für CPPS-spezifische Anwendungen (vgl. Abschnitt 5.1.3.1) die notwendigen intelligenten Funktionen (vgl. Abschnitt 5.1.2.2) im Steuerungs- und

Kommunikationssystem auszuführen. Zur Darlegung der Zusammenhänge zwischen intelligenten Funktionen und IuK-Technologien (Abbildung 39) wird sich an LEWIN & FAY (2018) orientiert. Beispielsweise bedingt die Ausführung der intelligenten Funktion Kommunikationsfähigkeit eine Kommunikationsschnittstelle als IuK-Technologie, wohingegen die automatische Informationsableitung zusätzlich die Informationsspeicherung und -verarbeitung erfordert.

Intelligente Funktionen / Informations- und Kommunikationstechnologien	Identifizierungsfähigkeit	Lokalisierbarkeit	Speicherung Objektinformationen	Monitoring / Überwachungsfähigkeit	Kommunikationsfähigkeit	Automatische Informationsableitung	Selbstständige Entscheidungsfähigkeit
Identifikator	●	○	○	○	○	○	○
Kommunikationsschnittstelle	○	●	○	○	●	●	●
Informationsspeicherung	○	○	●	●	○	●	●
Informationsverarbeitung	○	○	○	◐	○	●	●
Sensorik	◐	◐	○	●	○	○	○
Aktorik	○	○	○	○	○	◐	◐
Energieversorgung	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐

○ nicht benötigt ◐ teilweise benötigt ● benötigt

Abbildung 39: Zusammenhang von intelligenten Funktionen und IuK-Technologien in Anlehnung an LEWIN & FAY (2018)

Weiterhin sind basierend auf der Analyse von Fachliteratur (vgl. BÖSE 2012, DEINDL 2013, ADOLPHS ET AL. 2015, LEWIN & FAY 2018) die IuK-Technologien mit deren Ausprägungen (Tabelle 6) spezifiziert. So kann beim *Identifikator* die Identität eines Betriebsmittels durch aktive Identifikatoren (z. B. batteriebetriebener RFID-Chip) eigenständig mitgeteilt oder durch passive Identifikatoren (z. B. QR-Code) indirekt über Geräte (z. B. Scanner) erfasst werden. Daneben dient die *Kommunikationsschnittstelle* abhängig vom Interaktionsgrad zum Austausch des Betriebsmittels mit dessen Umwelt. Während dem Nutzer eine Rückmeldung (z. B. Warnsignal) erteilt sowie mit diesem über Ein- und Ausgabegeräte (z. B. Terminals) interagiert werden kann, wird mit dem Kommunikationssystem eine Datenübertragung und Interaktion (Koordination von Verhalten) ermöglicht. Die weiteren IuK-Technologien sind nachfolgend charakterisiert.

Tabelle 6: Charakterisierung von IuK-Technologien

Abk.	IuK-Technologie		Ausprägungen		
Id	Identifikator		kein (KE)	passiv (PA)	aktiv (AK)
Ks	Kommunikations-schnitt-stelle	Nutzer (N)	keine (KE)	Nutzer-rückmeldung (NR)	Nutzer-interaktion (NI)
		Ko.-Sys-tem (KS)	keine (KE)	Daten-übertragung (DÜ)	System-interaktion (SI)
Is	Informations-speicherung		keine (KE)	ausgelagert (AG)	eingebettet (EG)
Iv	Informations-verarbeitung		keine (KE)	ausgelagert (AG)	eingebettet (EG)
Se	Sensorik		keine (KE)	Zustands-erfassung (ZE)	Umwelt-erfassung (UE)
Ak	Aktorik		keine (KE)	Funktions-ausführung (FA)	Umwelt-manipulation (UM)
Ev	Energie-versorgung		keine (KE)	ausgelagert (AG)	eingebettet (EG)

Analog zur Steuerungs- und Kommunikationseinrichtung (vgl. Abschnitt 5.1.3.1) lässt sich die *Informationsspeicherung* und *-verarbeitung* über den Ort differenzieren. Demnach kann die Datenhaltung bzw. Informationsverarbeitung eingebettet im Betriebsmittel wie auch an ein Informationssystem ausgelagert sein. Ebenso verhält es sich mit der häufig zur Nutzung von IuK-Technologien notwendigen *Energieversorgung*, die am Betriebsmittel eingebettet (z. B. Batterie) sowie ausgelagert (z. B. Netzanschluss) vorliegen kann.

Des Weiteren lässt sich Sensorik und Aktorik hinsichtlich deren Integrationsfähigkeit charakterisieren. Es kann mit der *Sensorik* über eine oder mehrere Messgrößen die Erfassung vom Zustand des Betriebsmittels selbst und von dessen Umwelt stattfinden. Demgegenüber ermöglicht die *Aktorik* die physische Umsetzung getroffener Entscheidungen in Form von Umweltmanipulationen (z. B. Warentransport) oder eigenen Funktionsausführungen (z. B. Bearbeitungsgeschwindigkeit).

5.2 Konfigurationsmodellierung von Fertigungszellen

Basierend auf den generischen PPR-Datenmodellen (vgl. Abschnitt 5.1) lassen sich alternative Fertigungszellkonfigurationen in CPPS-Strukturen (vgl. Abschnitt 2.2.5) für Ausbaustufenkonzepte (vgl. Abschnitt 6.3.2) generieren. Dabei

kann eine große Anzahl an theoretisch möglichen Lösungsvarianten entstehen, die sich beispielsweise aus unterschiedlichen Ablaufstrukturen, Betriebsmittelkombinationen, Automatisierungskonzepten oder Lebenszyklusanforderungen ergeben. Für die effiziente, konsistente und vollständige Erarbeitung einer differenzierten und überschaubaren Anzahl an Zellkonfigurationsalternativen wurde ein Modellierungsansatz aufbauend auf der prinzipiellen Dimensionierungssystematik (vgl. Abschnitt 2.3.2) und den Vorarbeiten zur veränderungsfähigen und CPPS-spezifischen Planung von Produktionssystemen (vgl. Abschnitt 3.1 und 3.2) entwickelt.

Die **Konfigurationsmodellierung** (Abbildung 40) berücksichtigt bei der Gestaltung alternativer Zellkonfigurationen in CPPS-Strukturen deren technische und kapazitätsbezogene Auslegung sowie Rekonfiguration entsprechend den lebenszyklusorientierten Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.3.2 und 2.3.3). Das Modell setzt sich aus fünf aufeinander aufbauenden und sich gegenseitig bedingenden Konfigurationsbausteinen zusammen, die nachfolgend beschrieben sind.

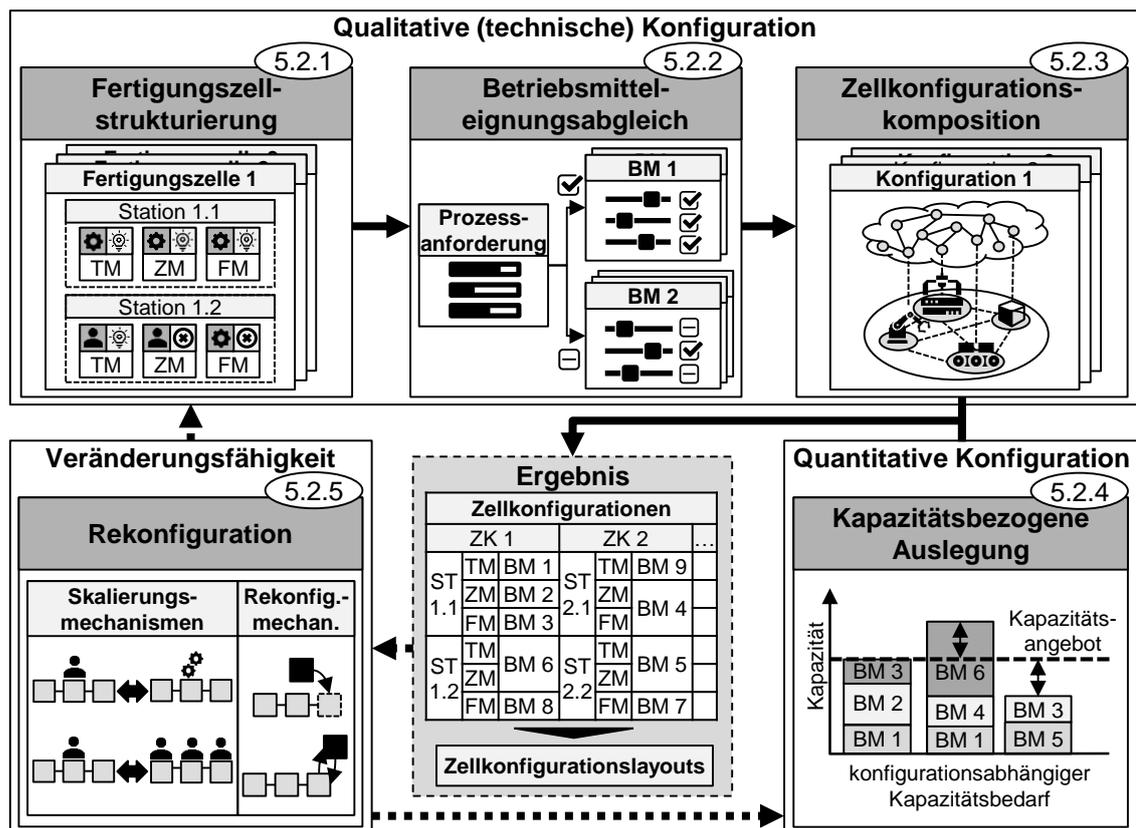


Abbildung 40: Ablauf der Konfigurationsmodellierung mit deren fünf Konfigurationsbausteinen in Anlehnung an VOIT ET AL. (2023)

Die **technische Auslegung** definiert die Struktur und technische Zusammensetzung einer Fertigungszellkonfiguration (vgl. Abschnitt 2.3.3). Mit dem *ersten*

Konfigurationsbaustein (Abschnitt 5.2.1) erfolgt dazu die Festlegung der Grundstruktur für eine Zellkonfiguration, indem der mögliche Lösungsraum abhängig von modularer Aufbaustruktur, technologischer Prozessfolge und steuerungstechnischen Randbedingungen aufgespannt wird. Der definierten Grundstruktur werden im *zweiten Konfigurationsbaustein* (Abschnitt 5.2.2) geeignete Betriebsmittel mittels eines PPR-basierten Betriebsmitteleignungsabgleichs zugeordnet, wodurch eine Auswahl alternativer Betriebsmittel zur Verfügung steht. Basierend auf der Grundstruktur mit den zugeordneten Betriebsmitteln findet im *dritten Konfigurationsbaustein* (Abschnitt 5.2.3) die Generierung CPPS-spezifischer Konfigurationsalternativen statt.

Die Gestaltung von Zellkonfigurationen erfordert neben der technischen auch eine **kapazitätsbezogene Auslegung** (vgl. Abschnitt 2.3.4) zur Erbringung der geforderten Ausbringungsmenge je Zeiteinheit (vgl. Abschnitt 6.3.1). Mithilfe des *vierten Konfigurationsbausteins* (Abschnitt 5.2.4) findet dazu die Gegenüberstellung der erforderlichen mit der verfügbaren Kapazität einer technischen Zellkonfiguration statt, um eine entsprechende Kapazitätsabstimmung zu ermöglichen.

Der modulare Aufbau einer Zellkonfiguration befähigt darüber hinaus zur **Rekonfigurierbarkeit** einzelner Betriebsmittel bzw. deren Modulen (vgl. Abschnitt 2.1.4 und 2.2.5), um eine lebenszyklusorientierte Anpassung an geänderte Anforderungen zu gewährleisten. Der *fünfte Konfigurationsbaustein* (Abschnitt 5.2.5) beinhaltet demnach Skalierungs- und Rekonfigurationsmechanismen für die Umgestaltung bestehender Zellkonfigurationen und greift für deren Durchführung auf die vier anderen Konfigurationsbausteine zurück.

5.2.1 Fertigungszellstrukturierung

Mit dem ersten Konfigurationsbaustein erfolgt die Festlegung der funktionalen Grundstruktur einer Zellkonfiguration in CPPS-Strukturen. Dazu bedarf es einer Kombination aus technologischer Prozesskette, modularer Aufbaustruktur und steuerungstechnischen Randbedingungen, um anhand dessen die modulspezifischen Anforderungen zu definieren. Aufbauend auf der Stationslandkarte von STÄHR (2020) ist dafür ein Konfigurationsstrukturmodell entwickelt, das um zentrale Bestandteile der Fertigungszellstruktur (vgl. Abschnitt 5.1.3.1) erweitert ist.

Das **Konfigurationsstrukturmodell** (Abbildung 41) definiert den zur Erarbeitung von Grundstrukturen möglichen Lösungsraum mithilfe der modularen, technologischen und steuerungstechnischen Ausprägungen von Stationen (Basismodul)

und Stationsmodulen. So lassen sich verschiedene Zellstrukturvarianten mit deren stationsbezogenen Basismodulen und den dazugehörigen Prozessen und Stationsmodulen konzipieren (z. B. Zellstruktur A mit Station A.1). Auf Basismodulebene werden hierbei die steuerungstechnischen Randbedingungen in Form der Automatisierungs- und CPPS-Leistungsstufen, die abhängig von den gewünschten CPPS-spezifischen Anwendungen (vgl. Abschnitt 5.1.3.1) festzulegen sind, ausgewiesen (z. B. Station A.1: Automatisiert (AU), Dateninterpretation (DI)). Anhand diesen Randbedingungen lassen sich somit auf Stationsmodulebene die Anforderungen hinsichtlich automatisierungs- und intelligenzbezogener Eigenschaften an das Transport-, Zuführ- und Fertigungsmodul einer Station determinieren (z. B. Transportmodul bei Station A.1: automatisiert, intelligent). Die Prozessverarbeitung und -zuteilung ist nachfolgend erläutert.

Stationsmodule		Transportmodul (TM)		Person		Werkzeug		Person		Werkzeug		Person		Werkzeug		
				☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	
		Zuführmodul (ZM)		Person		Werkzeug		Person		Werkzeug		Person		Werkzeug		
				☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	
		Fertigungsmodul (FM)		Person		Werkzeug		Person		Werkzeug		Person		Werkzeug		
				☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	
Zellstruktur	A	Station A.1													||	
		☒	☒	• Prozess 1												
		☒	☒	• Prozess 2												
	B	Station B.1														
		☒	☒	• Prozess 1												
		☒	☒	• Prozess 2												
		☒	☒	• Prozess 3												
		Station B.2														
		☒	☒	• Prozess 4												
	☒	☒	• Prozess 5													
☒	☒	• Prozess 6														

Legende:

	nicht automatisiert		nicht intelligent		CPPS-Leistungsstufe		Konzept x
	automatisiert		intelligent		Automatisierungsleistungsstufe		

Abbildung 41: Strukturkonfigurationsmodell aufbauend auf STÄHR (2020)

Die Ausgangsbasis zur Erarbeitung von fähigkeitsbasierten **Prozessfolgen** (Abbildung 42) stellen ausgewählte Primärprozesse (z. B. Fertigungsprozesse) aus der Technologieketten dar, die aus einer technologieunspezifischen Wertschöpfungskette abgeleitet sind (vgl. Abschnitt 5.1.2.1). Darauf basierend lassen sich mithilfe von Petri-Netzen (vgl. Abschnitt 5.1.2.1) die Primär- um erforderliche Sekundär-

prozesse (z. B. Handhabungsaufgaben) ergänzen und in alternative Prozessabfolgen überführen. Dabei kann anhand der fähigkeitsbasierten Taxonomie (vgl. Abschnitt 5.1.2.1) je nach gewünschtem Detaillierungsgrad für jeden Prozessschritt von den Grundoperationen (z. B. Fertigen, Handhaben) auf die spezifischen Operationen (z. B. Plansenken, Spannen) geschlossen werden. Die einzelnen Prozesse sind in Stationen bzw. deren Module gruppierbar.

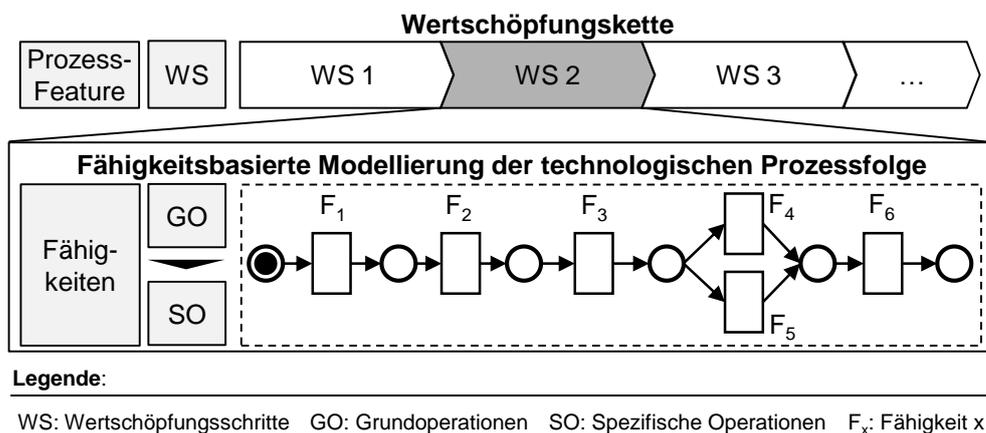


Abbildung 42: Ableitung und Modellierung der fähigkeitsbasierten Prozessfolge

Das Resultat des ersten Konfigurationsbauteins stellen mögliche Grundstrukturen für Fertigungszellkonfigurationen abhängig vom modularen Aufbau, den steuerungstechnischen Randbedingungen und der technologischen Prozessfolge dar. Eine Struktur gibt somit das Fundament für die Erarbeitung alternativer Zellkonfigurationen in CPPS-Strukturen vor.

5.2.2 Betriebsmitteleignungsabgleich

Aufbauend auf einer definierten Grundstruktur erfolgt in diesem Konfigurationsbaustein die Zuordnung anforderungsgerechter Betriebsmittel. Dazu bedarf es Betriebsmittel mit deren technologischen und steuerungstechnischen Eigenschaften (vgl. Abschnitt 5.1) bezüglich deren Eignung für die Grundstruktur zu untersuchen. Zur Eignungsprüfung wurde daher basierend auf dem PPR-Konzept (vgl. Abschnitt 2.3.3) ein Abgleichsverfahren entwickelt, das sich an den fähigkeits- und merkmalsbasierten Ansätzen von KLUGE (2011) und HÖRAUF (2019) orientiert und um einen steuerungstechnischen Funktionsabgleich erweitert ist.

Der mehrstufige **Eignungsabgleich** (Abbildung 43) führt die PPR-Modelle (vgl. Abschnitt 5.1) zusammen. Zunächst werden die Bauteilanforderungen aus der fähigkeitsbasierten Prozessfolge der Grundstruktur mit möglichen Betriebsmitteln

für Stationsmodule in einem technologischen Fähigkeitsabgleich zugewiesen. Anschließend werden auf Basis des steuerungstechnischen Funktionsabgleichs die relevanten Betriebsmittel mit den modulspezifischen Anforderungen hinsichtlich Automatisierungs- und Intelligenzeigenschaften weiter eingegrenzt, bevor die Betriebsmittel bezüglich deren Flexibilität in einem merkmalsbasierten Flexibilitätsabgleich abgestimmt werden. Abschließend liegen somit technologisch und steuerungstechnisch geeignete Betriebsmittel für jede Fähigkeit vor.

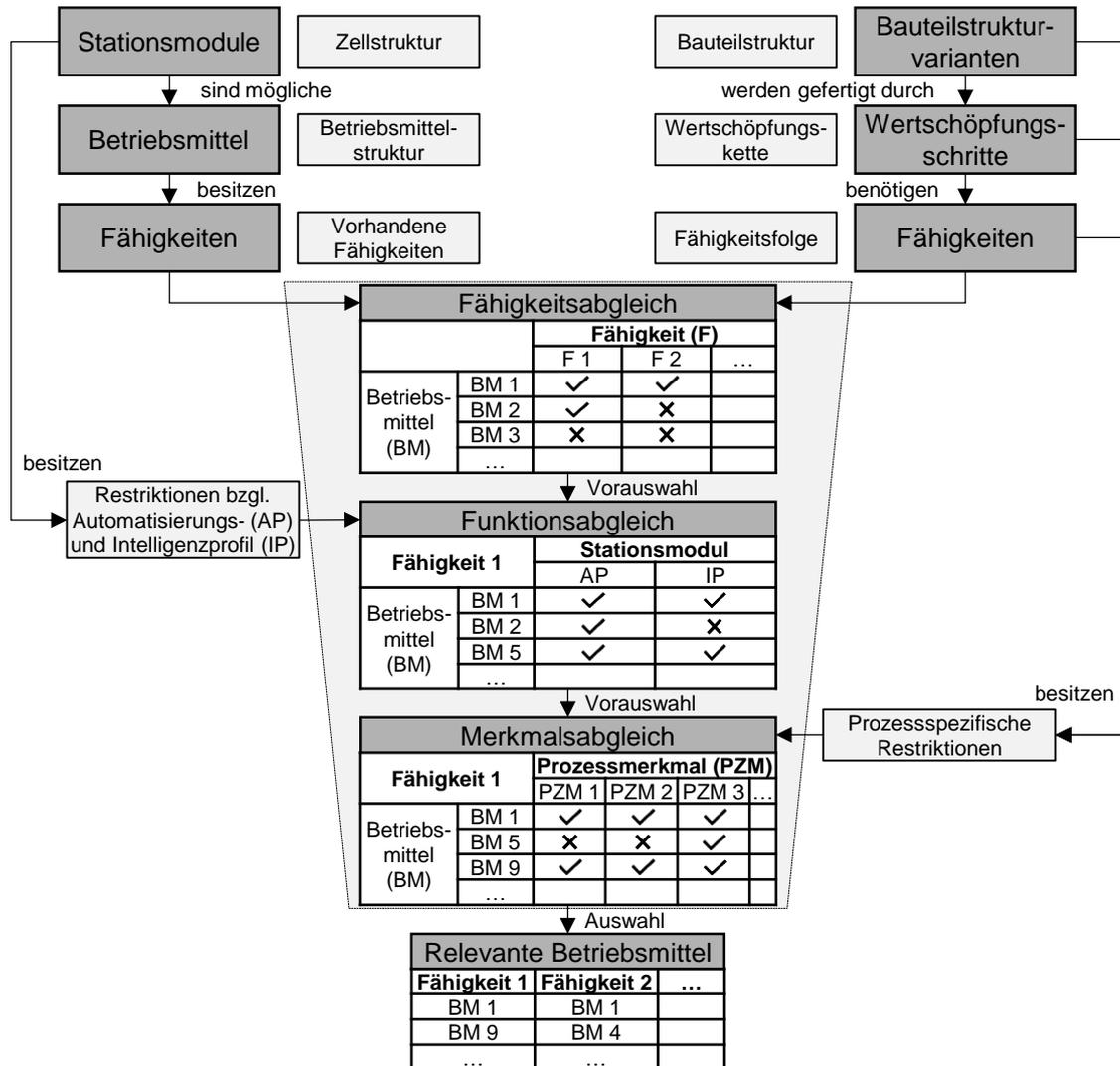


Abbildung 43: PPR-Eignungsabgleichsmodell aufbauend auf KLUGE (2011) und HÖRAUF (2019)

Mit dem **Fähigkeitsabgleich** findet eine Technologieprüfung statt, indem Betriebsmittel hinsichtlich technologischer Anforderungen abgestimmt werden. Dazu erfolgt ein Vergleich der vorhandenen Fähigkeiten von Betriebsmitteln (vgl. Abschnitt 5.1.3.2) mit den geforderten Fähigkeiten des Fähigkeitsablaufs für die

Bauteilherstellung (vgl. Abschnitt 5.2.1). Der Abgleich beruht auf einem 1:1-Vergleich und liefert eine Vorauswahl an relevanten Betriebsmitteln je Fähigkeit.

Zur weiteren Einschränkung der vorgenommenen Vorauswahl dient der steuerungstechnische **Funktionsabgleich**. Dieser erfolgt durch Gegenüberstellung der erforderlichen Restriktionen aus dem Automatisierungs- und Intelligenzprofil der Grundstruktur (vgl. Abschnitt 5.1.3.1 und 5.2.1) mit den vorhandenen Automatisierungs- und Intelligenzeigenschaften der Betriebsmittel (vgl. Abschnitt 5.1.3.2), wobei lediglich die Mindestanforderungen überprüft werden. Entsprechend kann einer Fähigkeit in einem automatisierten Fertigungs-, Transport- oder Zuführmodul nur ein mindestens grundlegend automatisiertes Betriebsmittel zugewiesen werden. Analog gilt dies für Fähigkeiten in intelligenten Modulen, denen ausschließlich Betriebsmittel mit zumindest einer IuK-Technologie zuordenbar sind.

Anschließend werden die technologisch und steuerungstechnisch relevanten Betriebsmittel bei der Flexibilitätsprüfung mithilfe eines **Merkmalsabgleichs** untersucht. Dazu werden die aus den prozessspezifischen Restriktionen erforderlichen mit den vom Betriebsmittel angebotenen Prozess- bzw. Ressourcenmerkmalen (vgl. Abschnitt 5.1.3.2) abgeglichen. Bei prozessspezifischen Restriktionen sind neben produktspezifischen Anforderungen (vgl. Abschnitt 5.1.1 und 5.1.2.1) auch Umweltbedingungen oder Vorgänger- und Nachfolgerprozesse zu berücksichtigen. Beispielweise sind bei Bauteilen mit Werkstückträgern die Abmessungen und das Gewicht des Trägers beim Merkmalsabgleich miteinzubeziehen.

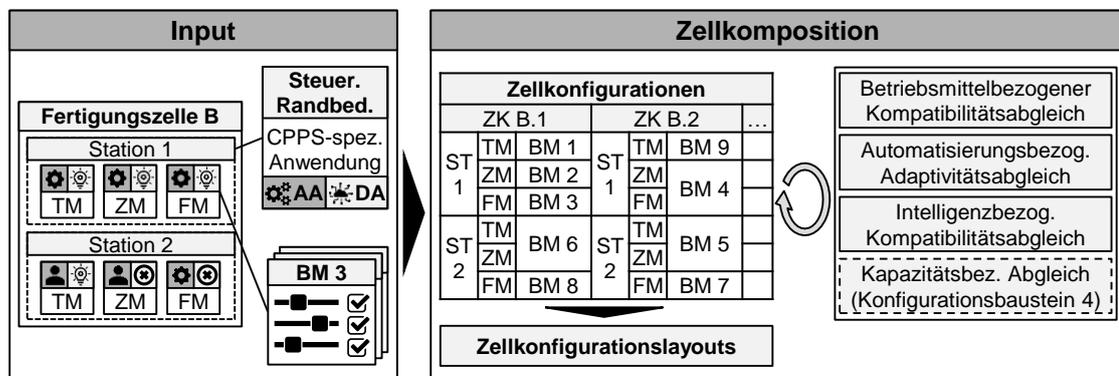
Bei der Gegenüberstellung der erforderlichen mit den vorhandenen Prozessmerkmalen stehen deren Merkmalsausprägungen im Fokus. Entsprechend findet dazu, wie bei HÖRAUF (2019), ein 1:1-, Intervall- oder Listen-Abgleich statt, wodurch die verschiedenen Arten der Merkmalsausprägungen im Produkt- und Ressourcenmodell (vgl. Abschnitt 5.1.1 und 5.1.3.2) Beachtung finden. Beim Intervall-Abgleich sind demnach Werte innerhalb eines metrischen Wertebereiches, ausgehend von einem Minimal- bis zu einem Maximalwert, berücksichtigt. Dagegen betrachtet ein Listen-Abgleich eine nominale oder ordinale Aufzählung an Werten. Ferner finden bei der Gegenüberstellung die Wechselwirkungen der Merkmale und -ausprägungen von zusammengesetzten Betriebsmittelkonfigurationen (vgl. Abschnitt 5.1.3.2) Berücksichtigung.

Als Ergebnis dieses Bausteins liegt somit eine Auswahl an technologisch und steuerungstechnisch relevanten Betriebsmitteln zur definierten Grundstruktur einer Zellkonfiguration vor. Im nachfolgenden Konfigurationsbaustein werden die ausgewählten Betriebsmittel zu alternativen Zellkonfigurationen kombiniert.

5.2.3 Zellkonfigurationskomposition

Basierend auf der Grundstruktur (vgl. Abschnitt 5.2.1) und Auswahl an möglichen Betriebsmitteln (vgl. Abschnitt 5.2.2), die den prozessspezifischen Stationsmodulen zugewiesen sind, lassen sich mit diesem Konfigurationsbaustein alternative Zellkonfigurationen erstellen. Für die Generierung alternativer Zellkonfigurationen wurde, abgeleitet aus bestehenden Forschungsansätzen (vgl. Abschnitt 3.1 und 3.2), ein entsprechendes Verfahren entwickelt.

Das **Konfigurationskompositionsverfahren** (Abbildung 44) basiert auf den Kombinationsmöglichkeiten der ausgewählten Betriebsmittel zu alternativen Zellkonfigurationen abhängig von den strukturellen, technologischen und steuerungstechnischen Randbedingungen der Grundstruktur. Mit dem Betriebsmittelkompatibilitätsabgleich werden dabei die gegenseitigen Abhängigkeiten der Betriebsmittel untersucht. Daneben dienen sowohl der automatisierungsbezogene Adaptivitäts- als auch der intelligenzbezogene Kompatibilitätsabgleich zur steuerungstechnischen Abstimmung möglicher Betriebsmittelkombinationen einer Zellkonfigurationsvariante. Im Folgenden sind die drei Abgleiche für die technische Auslegung von Zellkonfigurationen näher ausgeführt, bevor auf den dafür ebenfalls notwendigen kapazitätsbezogenen Abgleich (vgl. Abschnitt 5.2.4) eingegangen wird.



Legende:

ST: Station BM: Betriebsmittel AA: Assistenten DA: Datenanalyse ZK: Zellkonfiguration
 TM: Transportmodul ZM: Zuführmodul FM: Fertigungsmodul

Abbildung 44: Zellkonfigurationskompositionsverfahren

Um bei der Kombination von Betriebsmitteln deren zugrundeliegenden und gegenseitig abhängigen Restriktionen (z. B. mechanische, fluide Abhängigkeiten) systematisch zu berücksichtigen, dient der auf dem Ansatz von HEES (2017) basierende **Betriebsmittelkompatibilitätsabgleich** (Abbildung 45). Mit dem Abgleich erfolgt eine Gegenüberstellung der Betriebsmittel, um zwischen zulässigen und nicht zulässigen Kombinationen zu unterscheiden. So lässt sich beispielsweise

Modellbasierte Deskription und Konfiguration

Betriebsmittelkonfiguration 1.1 mit Betriebsmittelkonfiguration 2.1 kombinieren, jedoch nicht mit Betriebsmittelkonfiguration 3.3.

Betriebsmittelkompatibilitätsabgleich									
	BMK _{1,1}	BMK _{1,2}	...	BMK _{1,5}	BMK _{2,1}	BMK _{3,1}	BMK _{3,2}	BMK _{3,3}	...
BMK _{1,1}	Konfigurationsbereich von Betriebsmittel BM 1				1	1	1	0	...
BMK _{1,2}					0	1	1	1	...
...				
BMK _{1,5}					1	0	1	1	...
BMK _{2,1}	1	0	...	1	BM 2	1	1	1	...
BMK _{3,1}	1	1	...	0	1	Konfigurationsbereich von Betriebsmittel BM 3			...
BMK _{3,2}	1	1	...	1	1				...
BMK _{3,3}	0	1	...	1	1				...
...

Legende:

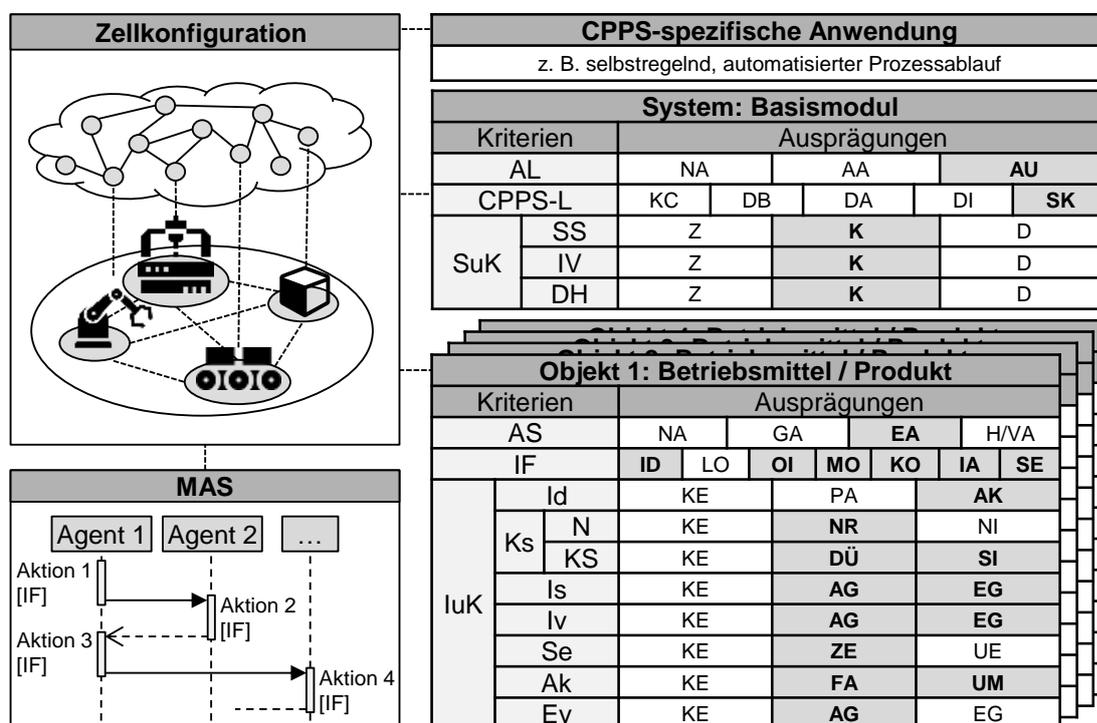
0: keine Kombination möglich 1: Kombination möglich BMK_j: Betriebsmittelkonfiguration j von Betriebsmittel BM i

Abbildung 45: *Kompatibilitätsabgleich von Betriebsmitteln in Anlehnung an HEES (2017)*

Die Kombination kompatibler Betriebsmittel abhängig von der Grundstruktur (vgl. Abschnitt 5.2.1) und der kapazitätsgerechten Auslegung (vgl. Abschnitt 5.2.4) führt zu alternativen Zellkonfigurationen, die mittels Layouts darstellbar sind. Für die Festlegung der Automatisierungseigenschaften einer Zellkonfigurationsvariante dient der in Anlehnung an NEUHAUSEN (2001) entwickelte **automatisierungsbezogene Adaptivitätsabgleich**, mit dem sich auch die bei einem individualisierten Werkstückspektrum wichtigen Rüstvorgängen zur Betriebsmittelanpassung determinieren lassen.

Der automatisierungsbezogene Adaptivitätsabgleich (Abbildung 46) ordnet dazu ausgewählte Betriebsmittel den Modulen bzw. Prozessen einer Zellkonfiguration zu und greift auf die über den PPR-Eignungsabgleich (vgl. Abschnitt 5.2.2) basierende Verknüpfung der produktseitig relevanten Prozessmerkmale mit den betriebsmittelspezifischen Produktionsprozessen zurück. Somit kann bei den Betriebsmitteln einer Zellkonfigurationsvariante bestimmt werden, ob und in welcher Form Rüstvorgänge aufgrund variierender Prozessmerkmale bzw. dessen Ausprägungen je Bauteilstrukturvariante auftreten. Die Rüstvorgänge sind hierbei hinsichtlich der Art der Automatisierung und des Umrüstungsmechanismus spezifizierbar (vgl. Abschnitt 5.1.3.2). Bei Letzterem wird zwischen der Anzahl von möglichen Einstellungen und Einstellungsänderungen bzw. Werkzeugen und Werkzeugwechseln differenziert.

Steuerungs- und Kommunikationseinrichtung (vgl. Abschnitt 5.1.3.1) als auch auf Objektebene für Produkt (vgl. Abschnitt 5.1.1) und Betriebsmittel (vgl. Abschnitt 5.1.3.2). Es lassen sich somit die relevanten Kriterienausprägungen für CPPS-spezifische Anwendungen systematisch determinieren. Auf Systemebene ergeben sich die Ausprägungen des Steuerungs- und Kommunikationssystems abhängig von der in der Grundstruktur (vgl. Abschnitt 5.2.1) festgelegten Automatisierungs- und CPPS-Level für die geforderte CPPS-spezifische Anwendung. Anhand dieser steuerungstechnischen Randbedingungen sowie der objektbezogenen Ermittlung intelligenter Funktionen wird die Spezifizierung erforderlicher IuK-Technologien in der physischen Umgebung ermöglicht.



Legende:

AL: Automatisierungsleistungsstufe CPPS-L: CPPS-Leistungsstufe SuK: Steuerungs- u. Kommunikationseinrichtung
 NA: Nicht automatisiert AA: Assiiert automatisiert AU: Automatisiert Z: Zentral K: Kombiniert D: Dezentral
 KC: Keine CPPS-Einbindung DB: Datenbereitstellung DA: Datenanalyse DI: Dateninterpretation SK: Selbstkonfig.
 SS: Art der Steuerungsstruktur IV: Ort der Informationsverarbeitung DH: Ort der Datenhaltung
 AS: Automatisierungsstufe IF: Intelligente Funktion IuK: Informations- und Kommunikationstechnologie
 GA: Grundlegend automatisiert EA: Erweitert automatisiert H/VA: Hoch- / vollautomatisiert
 ID: Identifikationsfähigkeit LO: Lokalisierbarkeit OI: Speicherfähigkeit Objektinformationen MO: Monitoring
 KO: Kommunikationsfähigkeit IA: Informationsableitung SE: Selbstständige Entscheidungsfähigkeit
 Id: Identifikator Ks: Kommunikationsschnittstelle Is: Informationsspeicherung Iv: Informationsverarbeitung
 Se: Sensorik Ak: Aktorik Ev: Energieversorgung KE: Keine PA: Passiv AK: Aktiv N: Nutzer
 KS: Kommunikationssystem NR: Nutzerrückmeldung NI: Nutzerinteraktion DÜ: Datenübertragung
 SI: Systeminteraktion AG: Ausgelagert EG: Eingebettet ZE: Zustandserfassung UE: Umwelterfassung
 FA: Funktionsausführung UM: Umweltmanipulation MAS: Multi-Agenten-System

Abbildung 47: Intelligenzbezogener Kompatibilitätsabgleich

Als wesentliches Hilfsmittel bei der objektspezifischen Bestimmung intelligenter Funktionen unterstützt das Sequenzdiagramm (vgl. Abschnitt 5.1.2.2). Durch die

damit stattfindende Modellierung des steuerungstechnischen Prozessablaufs lässt sich das Verhalten einzelner Agenten (Objekte, Steuerungseinrichtung) und deren Wirkzusammenhänge im MAS ableiten. Anhand den hierbei für die Aktionsausführung definierten intelligenten Funktionen und in Kombination mit den gegebenen Randbedingungen der Kommunikations- und Steuerungseinrichtung kann somit auf die erforderlichen IuK-Technologien der Objekte anhand der Zusammenhangsmatrix (vgl. Abschnitt 5.1.3.2) geschlossen werden. Zu berücksichtigen ist dabei, ob eine Funktionsausführung direkt am Objekt durch IuK-Technologien oder indirekt z. B. nur über einen digitalen Repräsentanten erfolgt. Erfüllen die Betriebsmittel die geforderten Kriterienausprägungen, ist deren steuerungstechnische Kompatibilität für die CPPS-spezifische Anwendung gegeben.

Als Ergebnis dieses Konfigurationsbausteins liegen, bestehend aus der Kombination von Betriebsmitteln, alternative Zellkonfigurationen vor. Die damit einhergehende kapazitätsbezogene Auslegung ist im nächsten Baustein ausgeführt.

5.2.4 Kapazitätsbezogene Auslegung

Die Auslegung einer Zellkonfiguration hängt stark von der zu erbringendem Ausbringungsmenge innerhalb einer Zeiteinheit ab (vgl. Abschnitt 2.3.4 und 6.3.1). Dementsprechend wird sich bei der Kapazitätsauslegung an dem Verfahren nach KETTNER ET AL. (1984) und GRUNDIG (2018) orientiert, welches, neben betriebsmittelbezogener Zellkomposition und Vorgabezeiten, das Fertigungsprogramm sowie deren Ausbringungsmenge berücksichtigt.

Bei der Kapazitätsauslegung wird die Bearbeitungskapazität bzw. der Kapazitätsbedarf mit dem verfügbaren Kapazitätsangebot einer Periode abgeglichen (Abbildung 48), um eine **Kapazitätsabstimmung** zu ermöglichen. Die Bearbeitungskapazität betrachtet dabei die erforderliche Belegungszeit für die produktabhängige Herstellung, wohingegen das Kapazitätsangebot die verplanbare bzw. vorhandene Belegungszeit repräsentiert (vgl. Abschnitt 2.3.4). Durch den Abgleich liegt somit eine Deckung (Angebot = Bedarf), Unterdeckung (Angebot < Bedarf) oder Überdeckung (Angebot > Bedarf) hinsichtlich des Kapazitätsbedarfes vor. Entscheidend zur Festlegung der erforderlichen Belegungszeit innerhalb einer Fertigungszelle ist diejenige der Engpassstation. Kann die geforderte Kapazität von einer möglichen Zellkonfiguration (vgl. Abschnitt 5.2.3) nicht gedeckt werden, ist diese zu verändern, falls keine Belastungsanpassung bzw. kein -abgleich (vgl. Abschnitt 2.3.4) erfolgt. Neben technischen sind dabei auch organisatorische Kapazitätsanpassungen umsetzbar (vgl. Abschnitt 2.3.4 und 5.2.5).

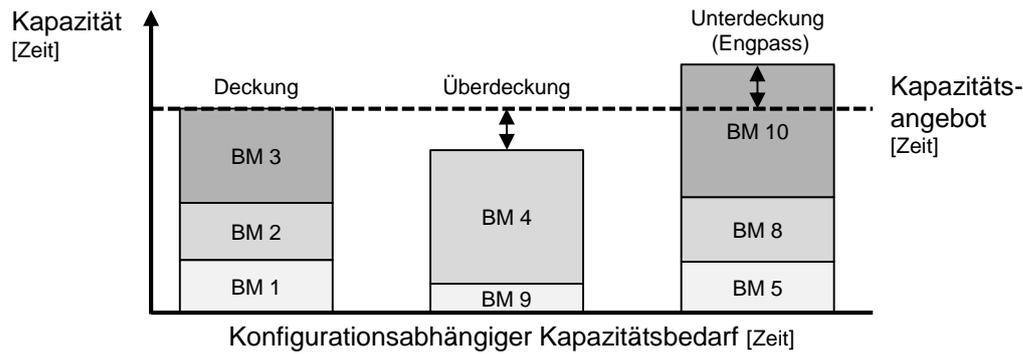


Abbildung 48: Gegenüberstellung von Kapazitätsangebot und konfigurationsabhängigem Kapazitätsbedarf

Das verfügbare **Kapazitätsangebot** T_{KA_i} errechnet sich aus den Arbeitstagen A_i , Einsatzzeiten t_i , Schichten S_i und den Zeitnutzungsgrad η_i . Der Nutzungsgrad ist infolge von z. B. Nacharbeiten oder Störungen stets kleiner als 1 und kann anhand von Richtwerten (vgl. z. B. KETTNER ET AL. 1984, GRUNDIG 2018) oder der OEE-Kennzahl (vgl. z. B. FOCKE & STEINBECK 2018) bestimmt werden, auf die über CPPS-spezifische Anwendungen Einfluss genommen werden kann (vgl. z. B. WINKLER ET AL. 2017). Die Formel zur Berechnung des Kapazitätsangebots lautet (KETTNER ET AL. 1984, GRUNDIG 2018):

$$T_{KA_i} = A_i \cdot t_i \cdot S_i \cdot \eta_i \quad (5-1)$$

mit

T_{KA_i} : vorhandene (verplanbare) Belegungszeit für Betriebsmitteltyp i

A_i : Anzahl Arbeitstage Betriebsmitteltyp i

t_i : vorhandene Einsatzzeit für Betriebsmitteltyp i je Tag und Schicht

S_i : Schichtanzahl für Betriebsmitteltyp i

η_i : Zeitnutzungsgrad für Betriebsmitteltyp i

Im Gegensatz dazu haben bei Berechnung des **Kapazitätsbedarfs** T_{KB_i} an den Betriebsmitteln die produkttypabhängigen Bearbeitungs- $t_{b_{ji}}$ und Rüstzeiten $t_{r_{ji}}$ sowie Ausbringungsmengen m_{ji} und Losanzahl l_{mj} einen maßgeblichen Einfluss. Der formelmäßige Zusammenhang ist wie folgt definiert (KETTNER ET AL. 1984, GRUNDIG 2018):

$$T_{KB_i} = \sum_{j=1}^J (t_{r_{ji}} \cdot l_{mj}) + \sum_{j=1}^J (m_{ji} \cdot t_{b_{ji}}) \quad (5-2)$$

mit

- T_{KB_i} : erforderliche Belegungszeit für Betriebsmitteltyp i
- $t_{r_{ji}}$: Rüstzeit für Produkttyp j auf Betriebsmitteltyp i
- l_{mj} : Losanzahl für Produkttyp j
- m_{ji} : Ausbringungsmenge für Produkttyp j auf Betriebsmitteltyp i
- $t_{b_{ji}}$: Bearbeitungszeit für Produkttyp j auf Betriebsmitteltyp i

Um aus dem zu bearbeitenden Werkstückspektrum mit dessen Bauteilstrukturvarianten (vgl. Abschnitt 5.1.1) eine überschaubare Anzahl an fertigungsbezogenen Produkttypen zu bestimmen, bedarf es die Bearbeitungsanforderungen der Bauteile in Hinblick auf das entsprechende Bearbeitungsverfahren zu untersuchen und entsprechend zu gruppieren (vgl. z. B. EVERSHEIM 1989). Somit lassen sich individualisierte Bauteile anhand von Bearbeitungseigenschaften (z. B. Bauteilformkomplexität) beispielsweise in leicht, mittel oder aufwändig zu bearbeitende Produkttypen mit kumulierter Ausbringungsmenge einteilen.

Für die Ermittlung von Vorgabezeiten, wie automatisierungsgradabhängige (vgl. Abschnitt 5.1.3.2) Bearbeitungs- und Rüstzeiten, existieren diverse Verfahren, wobei nach ZÜLCH (1996) neben der Ist-Zeitenerfassung auch Plan- und Soll-Zeiten bestimmbar sind. Für deren Ermittlung sei auf die Literatur zu Systeme vorbestimmter Zeiten (vgl. z. B. BOKRANZ & LANDAU 2012), Berechnungs- (vgl. z. B. WEBER 1999), Zeitaufnahmeverfahren (vgl. z. B. REFA 1997) oder Verfahren der Analogiebildung (vgl. z. B. MARTINO 1993) verwiesen.

Ferner ist bei einem individualisierten Werkstückspektrum die Rüsthäufigkeit (vgl. Abschnitt 5.2.3) von Bedeutung. Die entsprechende Losanzahl l_{mj} errechnet sich anhand der produkttypspezifischen Ausbringungsmenge m_{ji} und Losgröße m_{jL} mit nachfolgender Formel (GRUNDIG 2018):

$$l_{mj} = \frac{m_{jL}}{m_{ji}} \quad (5-3)$$

mit

- l_{mj} : Losanzahl für Produkttyp j
- m_{ji} : Ausbringungsmenge für Produkttyp j auf Betriebsmitteltyp i
- m_{jL} : Losgröße für Produkttyp j

Anhand der dargelegten Kapazitätsauslegung erfolgt somit in Kombination mit dem dritten Konfigurationsbaustein (vgl. Abschnitt 5.2.3) die Gestaltung einer Zellkonfiguration für geforderte Ausbringungsmengen (vgl. Abschnitt 6.3.1).

5.2.5 Rekonfiguration

Aufbauend auf diversen Vorarbeiten (vgl. Abschnitt 3.1) ist mit diesem Konfigurationsbaustein die systematische Rekonfiguration (Abbildung 49) von bestehenden Zellkonfigurationen (vgl. Abschnitt 2.2.5) unter Anwendung der anderen Konfigurationsbausteine (vgl. Abschnitt 5.2) beschrieben. Konkret lassen sich damit entlang dessen Lebenszyklus kapazitäts- und funktionalitätsbezogene Auswirkungen infolge von Veränderungstreibern (vgl. Abschnitt 2.1.2 und 6.2.2) identifizieren und entsprechende Rekonfigurationen umsetzen.

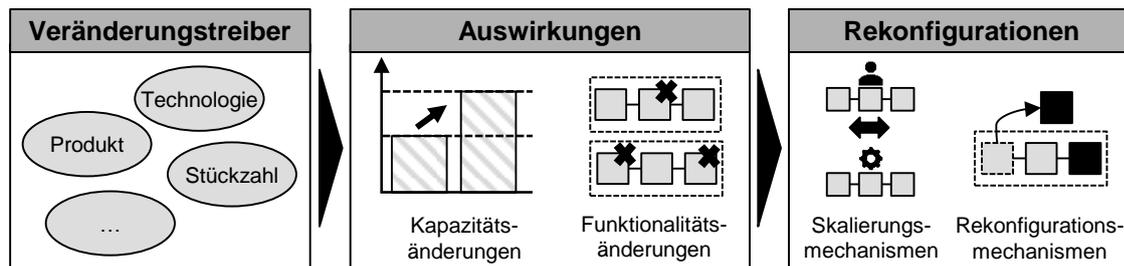


Abbildung 49: Systematische Umsetzung von Rekonfigurationen

Während der kapazitätsbezogene Abgleich (vgl. Abschnitt 5.2.4) zur Ermittlung kapazitätsrelevanter Anpassungsbedarfe für Stückzahl- oder Produktmixveränderungen dient, eignet sich der Betriebsmitteleignungsabgleich (vgl. Abschnitt 5.2.2) zur Bestimmung von Funktionalitätsänderungen für z. B. Produkt- oder Technologieveränderungen. Die entsprechende Umsetzung von Rekonfigurationen erfolgt über Skalierungs- und Rekonfigurationsmechanismen, die sich anhand den vier anderen Konfigurationsbausteinen (vgl. Abschnitt 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 und 5.2.4) implementieren lassen. Skalierungsmechanismen ermöglichen hierbei die gezielte Kapazitätsanpassung (vgl. Abschnitt 2.3.4), wohingegen mit Rekonfigurationsmechanismen die Umsetzung dieser Skalierungsmaßnahmen wie auch der Funktionalitätsänderungen an der Zellkonfiguration vollzogen wird.

Die Skalierungsmechanismen sind aufbauend auf Arbeiten von KRÜGER (2004), BLUMENAU (2006), WEYAND (2010), EILERS (2015) und STÄHR (2020) definiert und um den CPPS-spezifischen Steuerungseinfluss auf die Wandlungsfähigkeit (vgl. z. B. SCHOLZ-REITER & SOWADE 2010, 2011, MONOSTORI ET AL. 2016) ergänzt. Bei den **Skalierungsmechanismen** (Abbildung 50) wird grundsätzlich hinsichtlich organisatorischer und technischer Aspekte unterschieden. Die einzelnen Skalierungsmechanismen sind im Folgenden ausgeführt. Bezüglich deren Vor- und Nachteile wird auf die einschlägige Literatur (vgl. z. B. KRÜGER 2004, EILERS 2015) verwiesen.

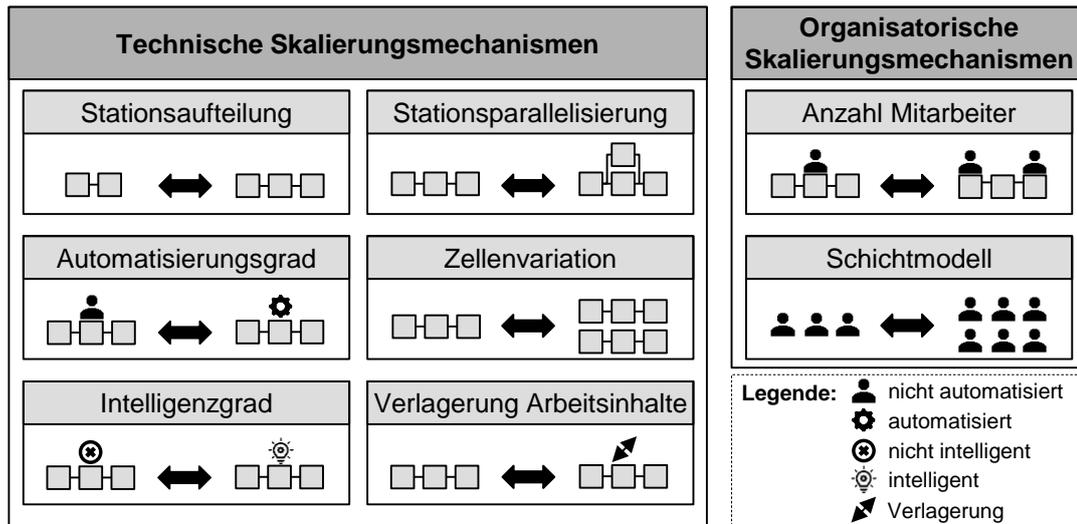


Abbildung 50: Technische und organisatorische Skalierungsmechanismen aufbauend auf EILERS (2015) und STÄHR (2020)

Die organisatorischen Skalierungsmechanismen sorgen für zeitliche und personelle Veränderungen. Die *Variation der Nutzungszeit* führt zu einer Verschiebung oder Reduzierung bzw. Steigerung der Arbeitszeit durch Änderungen am Schicht- oder Arbeitszeitmodell, was sich auf das verfügbare Kapazitätsangebot (vgl. Abschnitt 5.2.4) auswirkt. Demgegenüber beeinflusst die *Erhöhung oder Senkung der Mitarbeiteranzahl* die Ausbringungsleistung (vgl. Abschnitt 5.2.4). Dabei ist auch ein zellübergreifender Einsatz von Mitarbeitern möglich.

Mit den technischen Skalierungsmechanismen werden Anpassungen an der strukturellen Aufbaustruktur (vgl. Abschnitt 5.2.1) der Fertigungszelle implementiert, um darüber, wie bei den personellen Anpassungen, mengen- und intensitätsmäßige Veränderungen bei der Ausbringungsleistung zu erzielen. Bei der *stufenweisen Stationsaufteilung bzw. -zusammenfassung* findet eine Aufteilung der Arbeitsinhalte einer Station auf zusätzlich zu installierende Stationen oder in umgekehrter Weise eine Zusammenfassung der Inhalte mehrerer Stationen auf eine Station statt. Der Automatisierungs- oder Intelligenzgrad wird dabei nicht primär verändert. Ersteres erfolgt mit der (*stufenweisen*) *Anpassung des Automatisierungsgrades*, indem abhängig vom Automatisierungslevel der schrittweise Ausbau von einer nicht automatisierten über eine assistierte bis hin zur automatisierten Station bzw. Zelle oder der Rückbau in entgegengesetzter Richtung stattfindet. Mittels der (*stufenweisen*) *Anpassung des Intelligenzgrades* werden in Bezug zur CPPS-Leistungsstufe CPPS-spezifische Anwendungen inkrementell in der Zelle implementiert oder in konträrer Art wieder abgebaut.

Die *Parallelisierung von Stationen* zielt auf die Beseitigung eines kapazitiven Engpasses oder einer Überkapazität (vgl. Abschnitt 5.2.4) durch das Einbringen oder Entfernen von Parallelstationen ab. Dagegen erfolgt mit der *Variation der Zellenanzahl* eine Kapazitätserhöhung bzw. -senkung durch die Implementierung oder Elimination von identischen oder ähnlichen Zellen, ohne Änderungen an der bestehenden Zellkonfiguration vorzunehmen. Weiterhin bewirkt die *Verlagerung von Arbeitsinhalten* eine Ein- oder Ausgliederung von Inhalten in die Zelle bzw. aus dieser, was vorrangig zu Anpassungen am Prozess bzw. Prozessablauf führt.

Zur Umsetzung von Skalierungsmechanismen und Funktionalitätsänderungen sind harte und weiche Rekonfigurationen (vgl. Abschnitt 2.1.4) an den modular aufgebauten Zellkonfigurationen auszuführen. Entsprechend sind basierend auf den Grundlagen zur Rekonfigurierbarkeit (vgl. Abschnitt 2.1.4 und 2.2.5) **Rekonfigurationsmechanismen** (Abbildung 51) charakterisiert. Diese beziehen sich auf den Austausch, das Hinzufügen, Eliminieren oder intermodulare Anpassen „Plug & Produce“-fähiger Module innerhalb einer Fertigungszelle und ermöglichen damit die Durchführung von Konfigurationsänderungen.



Abbildung 51: Arten von Rekonfigurationsmechanismen

5.3 Fazit

Das fünfte Kapitel befasste sich mit der modellbasierten Deskription und Konfiguration zur Gestaltung rekonfigurierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen. Mit dem Beschreibungsmodell erfolgte dabei die standardisierte Deskription relevanter Planungsinformationen und -objekte anhand gängiger Richtlinien oder Modellierungsansätze. Demgemäß wurden basierend auf dem etablierten PPR-Konzept drei technologisch und steuerungstechnisch verknüpfte Partialmodelle erarbeitet und diese hinsichtlich CPPS-spezifischer Eigenschaften charakterisiert. Darauf aufbauend wurde die Konfigurationsmodellierung zur Gestaltung alternativer Zellkonfigurationen entwickelt, um die dabei große Vielfalt an Möglichkeiten zu beherrschen. Es umfasst fünf in sich geschlossene und aufeinander aufbauende Konfigurationsbausteine, mit denen die technische und kapazitätsbezogene Auslegung von Zellkonfigurationen einschließlich deren Rekonfiguration ermöglicht wird.

6 Methodisches Planungsvorgehen

Aufbauend auf dem modellbasierten Ansatz (vgl. Kapitel 5) wird in diesem Kapitel das methodische Vorgehen zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen erläutert. Eingangs wird dazu der Aufbau und Ablauf der Methode (Abschnitt 6.1) mit dessen drei Planungsphasen vorgestellt. Den Ausgangspunkt bildet die Analyse der Rahmenbedingungen (Abschnitt 6.2), ehe die Gestaltung der Ausbaustufenkonzepte (Abschnitt 6.3) und deren Bewertung (Abschnitt 6.4) erfolgen.

6.1 Übersicht zum methodischen Vorgehen

Das entwickelte Planungsvorgehen (Abbildung 52) dient Produktionssystemplanern als Leitfaden für die Grobplanung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen (vgl. Abschnitt 4.2) und orientiert sich in seiner Grundstruktur an dem wesentlichen Vorgehen der Produktionssystemplanung (vgl. Abschnitt 2.3.1). Es vereint dabei nicht nur die verifizierten Ansätze zur Planung modularer, skalierbarer Produktionssysteme (vgl. Abschnitt 3.1.1), sondern ist um CPPS-spezifische Aspekte erweitert. Das **Planungsvorgehen** unterteilt sich in die drei aufeinander aufbauenden Phasen Analyse der Rahmenbedingungen, Gestaltung der Ausbaustufenkonzepte sowie Bewertung und Auswahl. Als Ergebnis liegt eine präferierte Initialkonfiguration eines Ausbaustufenkonzeptes vor, wobei phasenbezogene Planungsinformationen und -ergebnisse zwischen den Phasen weitergegeben werden. Zudem wird maßgeblich auf den modellgestützten Beschreibungs- und Konfigurationsansatz (vgl. Kapitel 5) zurückgegriffen.

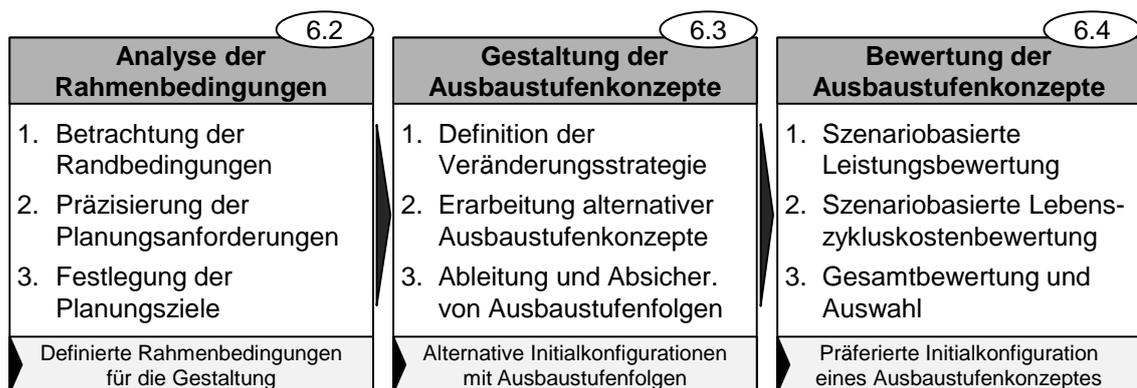


Abbildung 52: Übersicht zum Ablauf des methodischen Planungsvorgehens nach VOIT ET AL. (2023)

Mit der ersten Planungsphase **Analyse der Rahmenbedingungen** werden die fundamentalen Randbedingungen sowie spezifischen Planungsanforderungen und Planungsziele definiert. Bei Betrachtung der Randbedingungen wird sowohl auf grundlegende und veränderungsrelevante Aspekte eingegangen als auch ein besonderer Fokus auf die CPPS-spezifischen Voraussetzungen gelegt. Anschließend findet zur Präzisierung der spezifischen Planungsanforderungen eine szenario- und lebenszyklusbasierte Aufbereitung des zu bearbeitenden Fertigungsprogramms (vgl. Abschnitt 5.1.1) sowie weiterer Veränderungstreiber statt. Die Festlegung von Planungszielen beruht auf der Auswahl geeigneter Zielkriterien aus einem Kriterienkatalog und deren Priorisierung für das Planungsvorhaben.

Aufbauend auf den Rahmenbedingungen findet in der zweiten Planungsphase die **Gestaltung** modularer, skalierbarer Fertigungszellen in Form von Ausbaustufenkonzepten (vgl. Abschnitt 2.3.2) statt, um alternative Initialkonfigurationen mit möglichen Ausbaustufenfolgen zu erhalten. Eingangs wird dazu mit einer Definition der Veränderungsstrategie der Lösungsraum anhand von Ausbaustufen und prinzipieller Veränderungsstrategien eingegrenzt, bevor die Erarbeitung von Ausbaustufenkonzepten mithilfe der auf dem PPR-Modell basierenden Konfigurationsmodellierung (vgl. Abschnitt 5.2) erfolgt. Anhand den Ausbaustufenkonzepten werden anschließend Initialkonfigurationen mit Ausbaustufenfolgen für ausgewählte Szenarien abgeleitet und simulationsgestützt abgesichert, da sich zum Planungszeitpunkt aufgrund unsicherer Lebenszyklusentwicklung lediglich für eine Initialkonfiguration entschieden werden kann.

Den Abschluss der methodischen Vorgehensweise stellt die dritte Planungsphase **Bewertung und Auswahl** dar. Dabei wird eine szenariobasierte Kosten-Leistungsbewertung zur Auswahl eines präferierten Ausbaustufenkonzeptes bzw. dessen Initialkonfiguration durchgeführt. Zur multikriteriellen Leistungsbewertung ist eine Nutzwertanalyse vorgesehen, wohingegen die Kostenbewertung auf der szenariobasierten Lebenszykluskosten- und Kapitalwertberechnung beruht. Deren monetären und nicht monetären Bewertungsergebnisse fließen schließlich über ein Scoring-Verfahren in eine wahrscheinlichkeitsbasierte Gesamtbewertung ein, um eine differenzierte Auswahlentscheidung zu ermöglichen.

6.2 Analyse der Rahmenbedingungen

Ausgehend vom Anstoß zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen eines Produktionssystems (vgl. Abschnitt 4.2) erfolgt in der ersten Planungsphase die Analyse der Rahmenbedingungen. Im Folgenden werden dazu, angelehnt an

EVERSHEIM (1989), die fundamentalen Randbedingungen betrachtet (Abschnitt 6.2.1), die spezifischen Planungsanforderungen bezüglich der Bearbeitungsaufgabe, inklusive des Veränderungsraums, präzisiert (Abschnitt 6.2.2) und die relevanten Planungsziele festgelegt (Abschnitt 6.2.3).

6.2.1 Betrachtung der Randbedingungen

Um einen ersten Überblick über die Prämissen der Planungsaufgabe zu erhalten, werden in diesem initialen Planungsschritt die gegebenen Randbedingungen für die zu planende Fertigungszelle eines Fertigungssystems festgelegt. Neben grundlegenden und veränderungsrelevanten Randbedingungen liegt ein besonderer Fokus auf den CPPS-spezifischen Restriktionen des Fertigungssystems.

Die **Randbedingungen** ergeben sich aus den Vorgaben des bestehenden bzw. übergeordneten Gesamtprojektes zur Planung des Fertigungssystems (vgl. Abschnitt 4.2) und lassen sich projektspezifisch beispielsweise unter Einsatz von Checklisten, Fragebögen etc. ergänzen. Bei der systematischen Betrachtung bzw. Festlegung von Randbedingungen sind gemäß einer Literaturanalyse (vgl. z. B. KRÜGER 2004, SLAMA 2004, BLUMENAU 2006) insbesondere Aspekte aus folgenden Bereichen von Relevanz:

- *Produkt*: Produktvielfalt, Stückzahlverteilung, Absatzvolumen, Absatzentwicklung, Prognosesicherheit usw.
- *Organisation*: Fertigungs-, Logistik-, Dispositions-konzept usw.
- *Infrastruktur und Technik*: Flächen, bauliche Restriktionen, IT-Infrastruktur, modulare Systemstruktur usw.
- *Prozess*: Fertigungstechnologien, Wertschöpfungsschritte usw.
- *Personal*: Qualifikationen, Löhne, Schichtmodelle usw.
- *Planungsvorgaben*: Investitionsvolumen, Betrachtungszeitraum usw.

In diesem Zusammenhang ist bezüglich des zweckmäßigen Methodikeinsatzes der grundsätzliche Bedarf nach Veränderungsfähigkeit (vgl. Abschnitt 2.1.2) im Sinne der lebenszyklusorientierten Planung (vgl. Abschnitt 2.3.2) zu hinterfragen. Ist diese gegeben, ist weiterhin zu prüfen, ob das zugrundeliegende Fertigungssystem für die zu planende Fertigungszelle die **CPPS-spezifischen Voraussetzungen** erfüllt. Dazu bedarf es das Fertigungssystem hinsichtlich technischer und organisatorischer Randbedingungen zu untersuchen. Falls die Voraussetzungen dabei nicht vorliegen, ist die Methodik im Hinblick auf die CPPS-spezifischen Steuerungseigenschaften einzuschränken.

Das geeignete Steuerungsverfahren eines Fertigungssystems lässt sich grundsätzlich anhand dessen organisatorischer Struktur (vgl. Abschnitt 2.1.1) ableiten. Insbesondere bei der Einzel- und Kleinserienfertigung individualisierter Teilefamilien (vgl. Abschnitt 2.1.1) liegt ein hoher Bedarf an CPPS-spezifischer Autonomie bzw. Selbststeuerung vor (vgl. z. B. LUCZAK & EVERSHEIM 1999, PHILIPP 2014). Zur Beurteilung der Relevanz von Autonomie in Fertigungssystemen wird zum Beispiel auf den morphologischen Ansatz von GRONAU (2016, 2018, 2019) verwiesen (vgl. Abschnitt 3.2.2), der auf der weit verbreiteten organisatorischen Betriebstypologie (vgl. z. B. DANGELMAIER & WARNECKE 1997) beruht.

Ferner dienen Reifegradmodelle zur CPPS-bezogenen Beurteilung technischer Randbedingungen eines Fertigungssystems (vgl. Abschnitt 2.2). In der Literatur existiert eine Vielzahl solcher Modelle (vgl. z. B. LEE ET AL. 2015, BAUERNHANSL ET AL. 2016, SCHUH ET AL. 2017, HELLMICH ET AL. 2022), wobei in dieser Arbeit das weit verbreitete 5C-Architekturmodell (vgl. Abschnitt 2.2.2) angewendet wird. Ist die höchste CPPS-Stufe erreicht, sind die technischen Voraussetzungen für die vollumfängliche Leistungsfähigkeit grundsätzlich gegeben, sofern die physische Basis durch intelligente und „Plug & Produce“-fähige Produktionsmodule in den CPPS-Strukturen gewährleistet ist (vgl. Abschnitt 2.1.4 und 2.1.5).

6.2.2 Präzisierung der Planungsanforderungen

Im zweiten Planungsschritt erfolgt die Präzisierung der Planungsanforderungen basierend auf den Eingangsinformationen für die zu planende Fertigungszelle (vgl. Abschnitt 4.2). Entscheidend bei deren lebenszyklusorientierten Planung ist dabei der erforderliche Veränderungsraum, um auf zukünftig auftretende Veränderungstreiber, die eine Umplanung bewirken können, adäquat zu reagieren (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Zur Definition der veränderungsspezifischen Anforderungen an die zu planende Zelle erfolgt die Aufbereitung des Veränderungsraums anhand von sechs **Veränderungsdimensionen** (Abbildung 53), denen bekannte und potenziell mögliche Veränderungen in Form von Veränderungstreibern zugeordnet werden (vgl. Abschnitt 2.1.2). Im Gegensatz zu den Dimensionen Zeit und Stückzahl, die einen allgemeingültigen Charakter besitzen, weist eine auftretende Veränderung in der produkt-, qualitäts-, kosten- oder technologiebezogenen Veränderungsdimension eine im konkreten Anwendungsfall bestimmbare Auswirkung auf die Fertigungszelle auf (CISEK 2005, STÄHR 2020). Im Folgenden wird die strategische Vorausplanung der einzelnen Veränderungsdimensionen dargelegt.

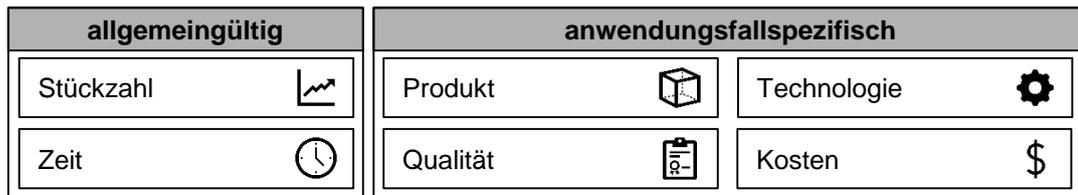


Abbildung 53: Veränderungsdimensionen in Anlehnung an CISEK ET AL. (2002) und STÄHR (2020)

Die wesentliche Basis für die Planung von Ausbaustufenkonzepten bilden die **allgemeingültigen Veränderungsdimensionen** in Form der lebenszyklusbezogenen Entwicklung des Fertigungsprogramms (Abbildung 54), die der Methodik als Eingangsinformationen (vgl. Abschnitt 4.2) zugrunde liegen. Es beinhaltet das zu bearbeitende Werkstückspektrum mit dessen Bauteilstrukturvarianten (vgl. Abschnitt 5.1.1) und Stückzahlen über den Planungshorizont in prognostizierten Szenarien (vgl. Abschnitt 2.3.2). So lässt sich beispielsweise anhand eines wahrscheinlichen, pessimistischen und optimistischen Szenarios (vgl. z. B. KRÜGER 2004, BLUMENAU 2006, KLUGE 2011, EILERS 2015) der stückzahlspezifische Veränderungsraum je Bauteilvariante über die Zeit beschreiben. Den einzelnen Szenarien ist dabei eine Eintrittswahrscheinlichkeit in Prozent zuweisbar.

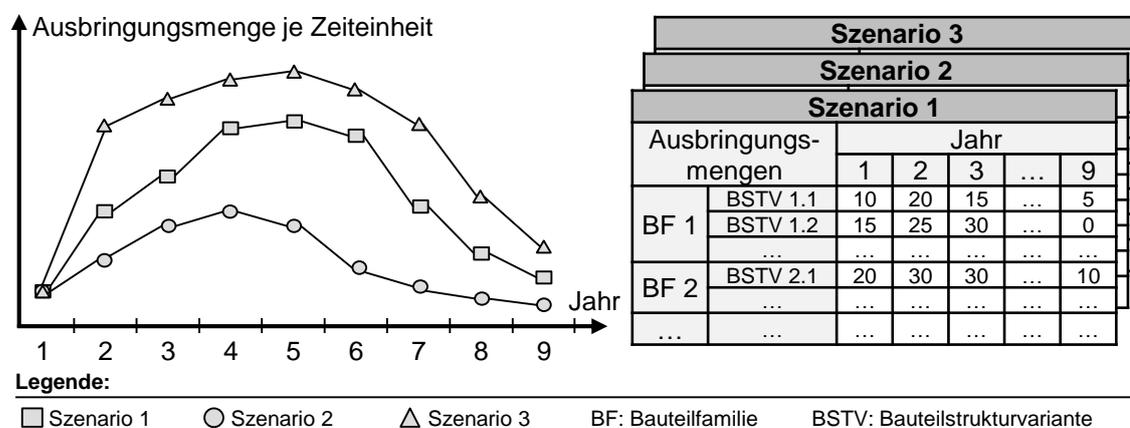


Abbildung 54: Szenariobasierte Entwicklung des Fertigungsprogramms

Neben dem Variantenmix sind in der Veränderungsdimension Produkt die anwendungsfallspezifisch auftretenden Produktveränderungen zu betrachten. Entscheidend sind hierbei die zukünftigen Veränderungen der Ausprägungen von Produktmerkmalen. Die Veränderungen in Form z. B. neuer Werkstoffe, Formen oder größerer Abmessungen lassen sich basierend auf der Bauteilfamilienstrukturmatrix aus den Produktsteckbriefen (vgl. Abschnitt 5.1.1) ableiten. Dazu werden die Produktmerkmale neu einzuführender Bauteilstrukturvarianten hinsichtlich denen des

bestehenden Werkstückspektrums abgeglichen. Die identifizierten Treiber sind in einen Veränderungsdimensionenkatalog überführbar.

Der Veränderungsdimensionenkatalog (Abbildung 55) wurde aufbauend auf Vorarbeiten (vgl. KLEMKE ET AL. 2012, KLEMKE 2014, WIENDAHL ET AL. 2014, STÄHR 2020) entwickelt und ermöglicht die tabellarische Auflistung von Veränderungstreibern der **anwendungsfallspezifischen Veränderungsdimensionen**. Neben den produktspezifischen werden damit die weiteren auf die Fertigungszelle wirkenden Veränderungstreiber in den Dimensionen Technologie, Kosten und Qualität spezifiziert. Dabei ist je Treiber der früheste, wahrscheinlichste und späteste jährliche Eintrittszeitpunkt festgelegt, die Eintrittswahrscheinlichkeit in Prozentangaben abgeschätzt und eine einfache oder mehrfache Zuordnung zu den szenariospezifischen Fertigungsprogrammen vorgenommen. Beispielsweise wird in der Dimension Technologie ein anlagenspezifischer Software-Release, wie neue CPPS-spezifische Steuerungsfunktionen, innerhalb der nächsten zwei bis vier Jahre mit hoher Wahrscheinlichkeit erwartet, welcher für das zukünftige Fertigungsprogramm des zweiten und dritten Szenarios relevant sein kann.

Veränderungsdimension	Veränderungstreiber	Eintrittszeitpunkt (Jahr)			Eintrittswahrscheinlichkeit	Szenariorelevanz
		Frühstens	Wahrscheinlich	Spätestens		
Technologie	Release neuer Anlagenfunktionen	2	2	4	80 %	Sz1, Sz2, Sz3

Kosten	Stark steigende Personalkosten	4	5	6	60 %	Sz1, Sz2, Sz3

Produkt	Einführung neuer Bauteilwerkstoffe	4	4	5	100 %	Sz3

Qualität	Neue gesetzl. Richtlinie zu Prozesssicherheit	3	3	4	70 %	Sz1, Sz2, Sz3

Abbildung 55: Exemplarischer Veränderungsdimensionenkatalog zur Dokumentation anwendungsspezifisch auftretender Veränderungstreiber

6.2.3 Festlegung der Planungsziele

Aufbauend auf den Randbedingungen und Planungsanforderungen sind für die Gestaltung und Bewertung der Ausbaustufenkonzepte (vgl. Abschnitt 6.1) Planungsziele zu konkretisieren bzw. festzulegen. Das oberste Produktionsziel eines Unternehmens stellt im Sinne der Überlebensfähigkeit dessen wirtschaftlicher Erfolg dar (WESTKÄMPER 2006). Davon ausgehend sind die Planungsziele in der Fabrik- und Produktionssystemplanung abgeleitet (WESTKÄMPER 2006, PAWELLEK 2014).

Diese bilden somit die zentrale Basis für die planende Fertigungszelle des entsprechenden Produktionssystems und lassen sich um spezifische Ziele ergänzen.

Ein allgemeingültiges Bewertungssystem zur Strukturierung von Planungszielen in der Produktion stellt das Zieldreieck dar, welches die **Zieldimensionen** Kosten, Qualität und Zeit in einem Spannungsfeld repräsentiert (WESTKÄMPER 2006, WIENDAHL ET AL. 2014). Bezogen auf das Planungsvorhaben ist das Dreieck um die Zieldimension der Veränderungsfähigkeit (vgl. Abschnitt 2.1.2) zu einer Zielpyramide (Abbildung 56) erweitert. Den einzelnen Dimensionen ist aufbauend auf einer Literaturrecherche (vgl. EVERSHEIM 1989, HARTMANN 1992, WESTKÄMPER 2006, EILERS 2015) eine exemplarische Auswahl an Zielkriterien zugewiesen. Darüber hinaus kann eine Kategorie Sonstiges Kriterien, wie Image, Mitarbeiterqualifikation, Arbeitszeitgestaltung oder Ergonomie aufweisen. Da die Verfolgung einzelner Zieldimensionen einem gewissen Zielkonflikt unterliegt, ist ein anwendungsspezifisches Optimum für das Planungsobjekt zu finden.

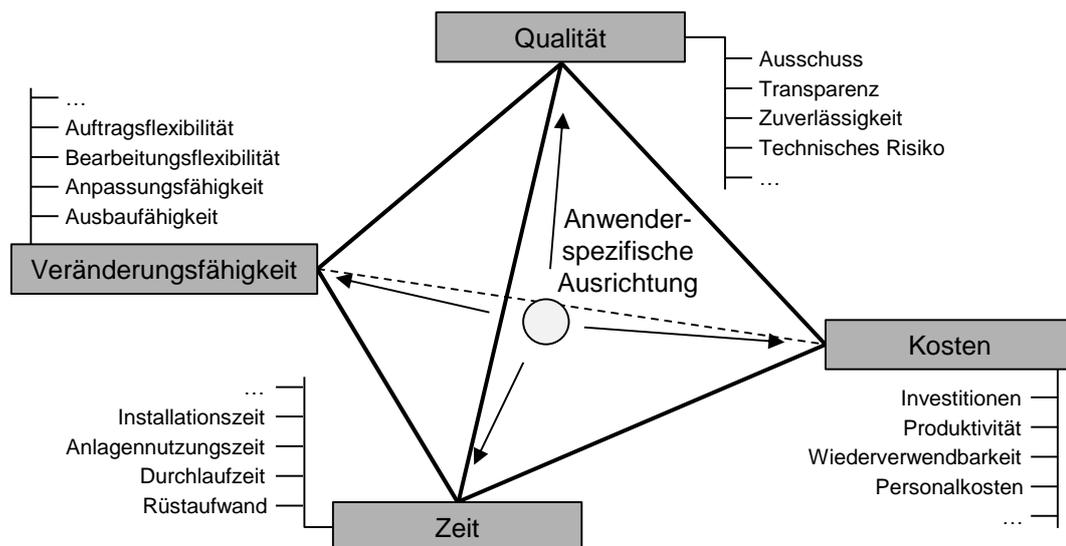


Abbildung 56: Zielpyramide mit vier Zieldimensionen

Bei der auf dem Zielsystem basierenden Auswahl geeigneter Zielkriterien empfiehlt es sich im Sinne der **Zielfestlegung** eine Unterscheidung zwischen Muss-, Soll- und Kann-Kriterien vorzunehmen (SLAMA 2004). Muss-Kriterien, wie maximales Investitionsbudget oder gesetzliche Regelungen, stellen zwingend zu erfüllende Ziele dar, die sich lediglich abmildern lassen. Dagegen sind möglichst gut erfüllbare Soll-Kriterien, wie gute Ausbaufähigkeit oder hohe Bearbeitungsflexibilität, nach ihrer Relevanz für den Anwendungsfall zu gewichten. Hinsichtlich des Aufwands ist hierbei auf eine überschaubare Kriterienanzahl zu achten. Weiterhin sind nicht zwingend erfüllbare Kann-Kriterien als Wünsche definierbar.

Als Hilfsmittel zur quantitativen Gewichtung von Soll-Kriterien eignen sich vor allem auf dem Prinzip des paarweisen Vergleichs beruhende Verfahren, wie die Präferenzmatrix (vgl. SCHWEIZER 2008) oder das Matrix-Verfahren (vgl. KAPPLER & REHKUGLER 1991). Exemplarisch ist die Präferenzmatrix (Abbildung 57) nach SCHWEIZER (2008) erläutert. Dabei werden die Kriterien gegeneinander verglichen und die Ausprägungen nach Wichtigkeit in die Matrix übertragen. Je häufiger ein Kriterium als wichtiger gewertet wird, desto höher ist dessen Präferenz. Anhand eines Dreisatzes wird damit schließlich die Gewichtung jedes Kriteriums bestimmt.

Präferenzmatrix								
Zielkriterien		K ₁	K ₂	...	K _n	Summe	Gewichtung	Rang
K ₁	Kriterium 1		2	...	2	6	30 %	1
K ₂	Kriterium 2	0		...	1	3	15 %	3
...
K _n	Kriterium n	0	1	...		2	10 %	5
Summe						20	100 %	

Legende:

Zeile ist ... 0: unwichtiger 1: gleichwichtig 2: wichtiger ... als Spalte

Abbildung 57: Gewichtung ausgewählter Soll-Kriterien mittels Präferenzmatrix in Anlehnung an SCHWEIZER (2008)

6.3 Gestaltung der Ausbaustufenkonzepte

Aufbauend auf der Analyse der Rahmenbedingungen findet mit dieser Planungsphase die Gestaltung alternativer Ausbaustufenkonzepte (vgl. Abschnitt 2.3.2) unter Berücksichtigung der notwendigen Veränderungsfähigkeit statt. Die nachfolgende Vorgehensweise ist in ihrer Grundstruktur aus den Ansätzen zur Planung modularer, skalierbarer Produktionssysteme (vgl. Abschnitt 3.1.1) und zum stufenweisen Aufbau automatisierter Fertigungskonzepte (vgl. WESTKÄMPER 1977, BUBMANN 1983) abgeleitet sowie in drei Planungsschritte unterteilt.

Im ersten Schritt findet die Definition von Veränderungsstrategien (Abschnitt 6.3.1) statt, bevor darauf aufbauend Ausbaustufenkonzepte mit deren stufenbezogenen Fertigungszellkonfigurationen gestaltet (Abschnitt 6.3.2) werden. Abschließend werden aus den Ausbaustufenkonzepten alternative Ausbaustufenfolgen lebenszyklusorientiert abgeleitet und virtuell abgesichert (Abschnitt 6.3.3).

6.3.1 Definition der Veränderungsstrategie

Bei der Gestaltung von Ausbaustufenkonzepten, die aus einer Initialkonfiguration (Ausbaustufe 1) mit darauf basierenden Zellkonfigurationen (z. B. Ausbaustufe 2 und 3) bestehen (vgl. Abschnitt 2.3.2), ist insbesondere zu berücksichtigen, ob auftretenden Veränderungstreibern (vgl. Abschnitt 6.2.2) über die inhärente Flexibilität oder über Skalierungs- und Rekonfigurationsmechanismen (vgl. Abschnitt 5.2.5) entgegengewirkt wird (vgl. Abschnitt 2.1 und 2.2.5). Mit dem ersten Planungsschritt erfolgt demnach basierend auf den analysierten Rahmenbedingungen (vgl. Abschnitt 6.2) die Eingrenzung des Lösungsraums. Dazu werden Veränderungsstrategien für zu erarbeitende Ausbaustufenkonzepte mithilfe von Ausbaustufen und prinzipiellen Veränderungsstrategien festgelegt.

Zentrale Grundlage für die Ausbaustufenkonzepte bilden **Ausbaustufen** (Abbildung 58), um in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen möglichst nahe am optimalen Betriebspunkt zu produzieren (vgl. Abschnitt 2.2.5 und 2.3.4). Die Stufen definieren hierzu einen Korridor aus unterer und oberer Ausbringungsmenge je Zeiteinheit (z. B. 500 - 900 Stück pro Tag) und dienen damit zur stufenweisen Skalierung von Zellkonfigurationen über den Zeitverlauf (vgl. Abschnitt 2.3.2). Denn sobald entlang des Zeitverlaufs ein Korridor über- bzw. unterschritten wird, kann in die entsprechende Stufe gewechselt werden. Die Korridore gilt es vom Planer basierend auf den szenariobasierten Lebenszyklusverläufen, den weiteren veränderungsspezifischen Dimensionen (vgl. Abschnitt 6.2.2) und dessen Erfahrungen festzulegen oder aus Vorgaben bezüglich durchsatzbezogener Randbedingungen (vgl. Abschnitt 6.2.1) abzuleiten.

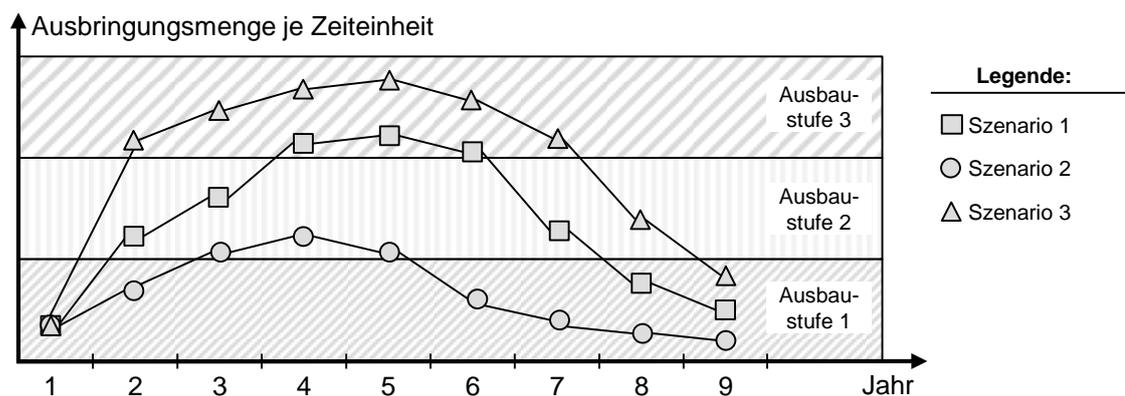


Abbildung 58: Ausbaustufen für szenariospezifische Ausbringungsmengen in Anlehnung an VOIT ET AL. (2023)

Methodisches Planungsvorgehen

Um basierend auf den Ausbaustufen eine überschaubare Anzahl und zugleich umfassende Bandbreite an alternativen Ausbaustufenkonzepten zu erarbeiten, kann je Alternative eine **prinzipielle Veränderungsstrategie** determiniert werden. Diese gibt die grundlegenden Gestaltungsrichtlinien für die Rekonfiguration der stufenbezogenen Zellkonfigurationen eines Ausbaustufenkonzeptes vor. Neben der kapazitätsbezogenen Anpassung (Skalierbarkeit) sind dabei auch Funktionalitätsänderungen (Konvertibilität) infolge anwendungsfallspezifischer Veränderungstreiber (vgl. Abschnitt 6.2.2) zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.2.5).

Die strategiebestimmenden Faktoren beziehen sich demnach auf die technischen und organisatorischen Skalierungsmechanismen sowie dem zur Umsetzung von technischen Anpassungen notwendigen Funktionalitätsänderungsgrad (vgl. Abschnitt 5.2.5) und sind zu einer Vielzahl an unterschiedlichen prinzipiellen Veränderungsstrategien (Abbildung 59) kombinierbar. Bei der Erarbeitung alternativer Zellkonfigurationen stehen insbesondere die technischen Skalierungsmechanismen wegen deren gestaltungsbeeinflussendem Charakter im Fokus. Die organisatorischen Mechanismen liefern dagegen zusätzliche potenzielle Ansätze zur Kapazitätsanpassung. Mit dem Funktionalitätsänderungsgrad wird darüber hinaus festgelegt, ob die Anforderungen von anwendungsfallspezifischen Veränderungstreibern möglichst über die Flexibilität oder Konvertibilität abzudecken sind. Somit kann zum Beispiel vorgegeben werden, dass eine zu planende Zellkonfiguration vornehmlich mit deren Flexibilität den produktspezifischen Veränderungstreibern entgegenwirken soll und nicht hinsichtlich deren Funktionalität umzubauen ist.

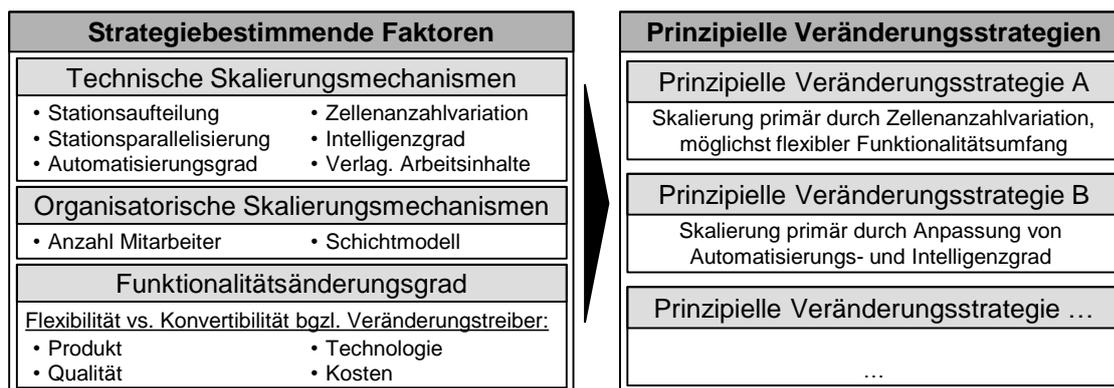


Abbildung 59: Festlegung prinzipieller Veränderungsstrategien

Die Entscheidung für die Auswahl prinzipieller Veränderungsstrategien und damit die Anzahl an zu planenden Ausbaustufenkonzepten hängt im Wesentlichen von den Planungszielen (vgl. Abschnitt 6.2.3), -anforderungen (vgl. Abschnitt 6.2.2) und Randbedingungen (vgl. Abschnitt 6.2.1) ab. Beeinflussende Kriterien stellen

beispielsweise die Investitionsbereitschaft, der Umbauaufwand, der geforderte Automatisierungsgrad, die IT-Infrastruktur oder die produktspezifischen Qualitätsanforderungen dar. Zudem gilt: Je weniger Vorgaben bei einer prinzipiellen Veränderungsstrategie gemacht werden, desto freier ist der Planer in der Erarbeitung eines Ausbaustufenkonzeptes.

Schlussendlich liegen mit diesem Planungsschritt Ausbaustufen und prinzipielle Veränderungsstrategien vor. Darauf basierend kann im nächsten Schritt die gezielte Ausarbeitung alternativer Ausbaustufenkonzepte erfolgen.

6.3.2 Erarbeitung alternativer Ausbaustufenkonzepte

Mit diesem Planungsschritt erfolgt die eigentliche Erarbeitung alternativer Ausbaustufenkonzepte. Dazu sind stufenbezogene Fertigungszellkonfigurationen zu den Ausbaustufenkonzepten entsprechend den prinzipiellen Veränderungsstrategien (vgl. Abschnitt 6.3.1) zu gestalten.

Für die iterative **Erarbeitung** (Abbildung 60) der strategiespezifischen Ausbaustufenkonzepte mit deren stufenbezogenen Zellkonfigurationen dient dem Planer die auf dem PPR-Datenmodell (vgl. Abschnitt 5.1) basierende Konfigurationsmodellierung (vgl. Abschnitt 5.2). Während sich die Zellkonfiguration der Basisstufe ohne Berücksichtigung weiterer Ausbaustufen planen lässt, sind die Konfigurationen der direkt vor- bzw. nachgelagerten Ausbaustufen mithilfe der Skalierungs- und Rekonfigurationsmechanismen (vgl. Abschnitt 5.2.5) umzugestalten. Um dabei eine Entscheidung hinsichtlich geeigneter Zellkonfigurationen zu treffen, dient eine vergleichende Grobbewertung der Alternativen. Im Folgenden sind die einzelnen Elemente der Alternativengenerierung erläutert.

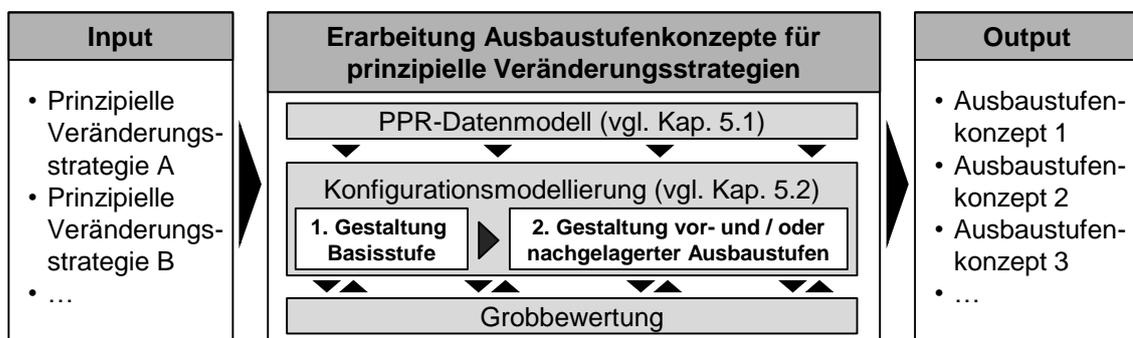


Abbildung 60: Vorgehensweise zur Erarbeitung von Ausbaustufenkonzepten

Die zentrale Basis bei der Generierung modularer, skalierbarer Fertigungszellen mithilfe der Konfigurationsmodellierung (vgl. Abschnitt 5.2) stellen die **PPR-Datenmodelle** (vgl. Abschnitt 5.1) dar. Zusätzlich zu den in der Analysephase (vgl. Abschnitt 6.2.2) betrachteten Produktmodellen sind daher die zur Verfügung stehenden Betriebsmittelmodelle (vgl. Abschnitt 5.1.3.2) erforderlich. Die Auswahl an Betriebsmitteln und Produkten ist dazu in einer de- oder zentral gepflegten Datenbank, z. B. PLM-System (vgl. Abschnitt 2.3.3), abgelegt bzw. initial zu hinterlegen. Als Grundlage zur Charakterisierung der Betriebsmittel mit deren Eigenschaften dienen etwa Datenblätter oder digitale Anlagenmodelle von Herstellern.

Sind die Produkt- und Ressourcenmodelle hinreichend charakterisiert, kann der Planer, basierend auf der **Zellkonfigurationsmodellierung** (vgl. Abschnitt 5.2), pfadabhängige Ausbaustufenkonzepte (Abbildung 61) mit deren stufenbezogenen Zellkonfigurationen gestalten. Die Gestaltung hängt von den prinzipiellen Veränderungsstrategien (vgl. Abschnitt 6.3.1) sowie den weiteren Rahmenbedingungen (vgl. Abschnitt 6.2) ab. Daher empfiehlt es sich, wie auch in Vorarbeiten (vgl. z. B. KLUGE 2011, EILERS 2015) beschrieben, mit der Zellkonfiguration der wichtigsten Ausbaustufe (Basisstufe) zu beginnen. Insbesondere bietet sich bei einer komplexeren Veränderungsstrategie, wie dem sukzessiven Ausbau von Automatisierungs- und Intelligenzgrad, der Start mit der höchsten Stufe an. Somit kann bereits in den vorgelagerten Stufen das erforderliche Ausbaupotenzial bei der Betriebsmittelauswahl berücksichtigt werden. Dagegen kann bei einfacheren Veränderungsstrategien, wie der Variation der Zellenanzahl, die Gestaltung der Zellkonfigurationen beginnend mit der ersten bis zur höchsten Ausbaustufe von Vorteil sein.

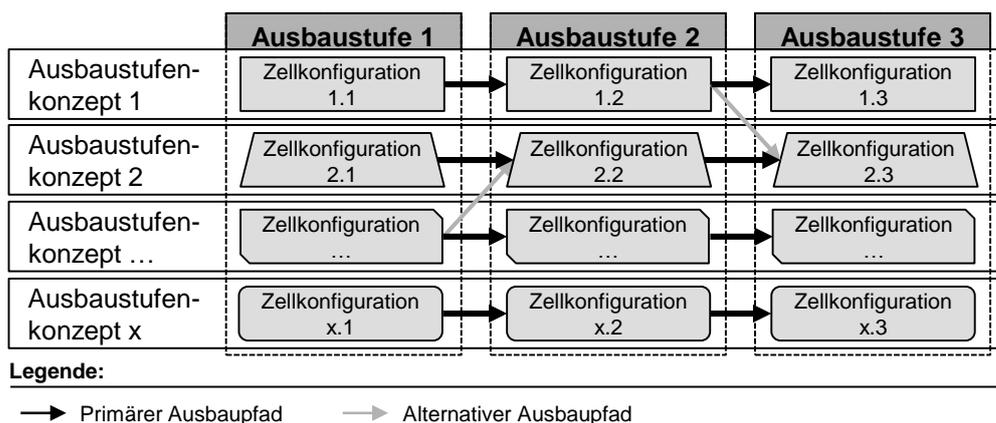


Abbildung 61: Ausbaustufenkonzepte mit deren pfadabhängigen Ausbaustufen in Anlehnung an EILERS (2015)

Bei der Grobplanung der Zellkonfiguration einer Basisstufe sind die ersten vier Konfigurationsbausteine der Zellkonfigurationsmodellierung (vgl. Abschnitt 5.2) sequenziell und iterativ anzuwenden. Dementsprechend werden, nach der Festlegung der funktionellen Grundstruktur einschließlich der Prozess- bzw. Fähigkeitsfolge (vgl. Abschnitt 5.2.1), relevante Betriebsmittel zugeordnet (vgl. Abschnitt 5.2.2), ehe sich daraus mögliche Zellkonfigurationsvarianten (vgl. Abschnitt 5.2.3) unter Berücksichtigung der Kapazitätsabstimmung (vgl. Abschnitt 5.2.4) generieren lassen.

Demgegenüber startet die Rekonfiguration von Zellkonfigurationen für weitere Ausbaustufen eines Ausbaustufenkonzeptes (Abbildung 62) mit dem fünften Konfigurationsbaustein (vgl. Abschnitt 5.2.5). Somit werden, abhängig von der prinzipiellen Veränderungsstrategie, ausgewählte Skalierungs- und Rekonfigurationsmechanismen initiiert, die anhand der vier anderen Konfigurationsbausteine (vgl. Abschnitt 5.2.1 - 5.2.4) zur Rekonfiguration einer Zellkonfiguration implementiert werden. Ist dabei ein vorgesehener strategiebestimmender Faktor der prinzipiellen Veränderungsstrategie nicht geeignet bzw. umsetzbar, sind alternative Skalierungs- und Rekonfigurationsmechanismen anzuwenden.

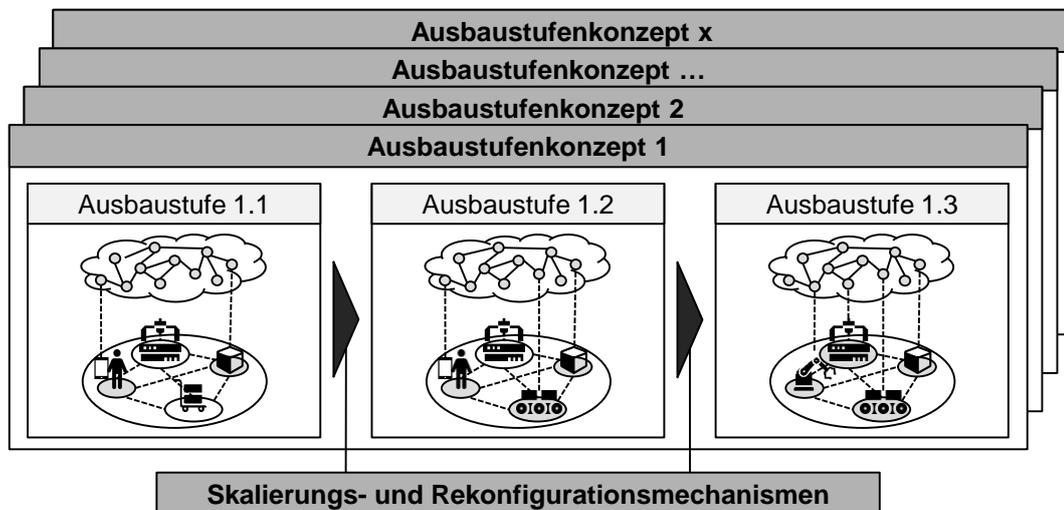


Abbildung 62: Ausbaustufenkonzepte mit deren stufenbezogenen Zellkonfigurationen nach VOIT ET AL. (2023)

Im Zuge der Gestaltung stufenabhängiger Zellkonfigurationen kann eine Vielzahl an alternativen Zellkonfigurationen entstehen. Hinsichtlich der Auswahl geeigneter Alternativen bedarf es demnach einer vergleichenden **Grobbewertung** abhängig von den Planungszielen (vgl. Abschnitt 6.2.3). Für die Grobbewertung bieten sich sowohl multikriterielle Bewertungsverfahren, wie die Nutzwertanalyse, als

auch monetäre Bewertungsverfahren mit Analogie- oder Experten-basierter Kostenschätzung an (vgl. Abschnitt 2.3.5). Eine detaillierte und umfassende Bewertung ist aufgrund einer ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung in diesem Planungsschritt nicht zielführend (vgl. Abschnitt 6.4).

Als Ergebnis des Planungsschrittes liegen somit alternative Ausbaustufenkonzepte, bestehend aus stufenabhängigen Zellkonfigurationen mit implementierten Skalierungs- und Rekonfigurationsmechanismen, vor. Diese gilt es im nächsten Schritt hinsichtlich der unsicheren zukünftigen Anforderungsentwicklung (vgl. Abschnitt 6.2.2) zu untersuchen.

6.3.3 Ableitung und Absicherung von Ausbaustufenfolgen

Aufgrund der unsicheren Lebenszyklusentwicklung und der damit einhergehenden Veränderungsfähigkeit (vgl. Abschnitt 6.3.1) kann sich zum Planungszeitpunkt lediglich für eine Initialkonfiguration der Ausbaustufenkonzepte entschieden werden, da auf dieser die Zellkonfigurationen der weiteren Ausbaustufen aufbauen. Abhängig von den szenariospezifisch auftretenden Veränderungstreibern kann eine Vielzahl an szenariospezifischen Ausbaustufenfolgen möglich sein (vgl. Abschnitt 2.3.2) sowie die Leistungs- und Funktionsfähigkeit der stufenbezogenen Zellkonfigurationen beeinflusst werden. Für ein effizientes Vorgehen bei der Entscheidungsfindung erfolgt daher, basierend auf den entwickelten Ausbaustufenkonzepten, die Ableitung von Ausbaustufenfolgen für ausgewählte Szenarien sowie die virtuelle Absicherung der Leistungs- und Funktionsfähigkeit relevanter Zellkonfigurationen.

Zur szenariospezifischen **Ableitung** von Ausbaustufenfolgen (Abbildung 63) werden, ähnlich wie bei KLUGE (2011), die stufenbezogenen Zellkonfigurationen eines Ausbaustufenkonzeptes den einsatzbezogenen Zeitpunkten bzw. -abschnitten eines ausgewählten Lebenszyklusszenarios zugeordnet und chronologisch aneinandergereiht. Es liegt somit zu jedem Ausbaustufenkonzept eine Initialkonfiguration mit szenariospezifisch unterschiedlichen Ausbaustufenfolgen vor. Zu beachten ist dabei, dass neben den kapazitätsbezogenen Skalierungsmechanismen auch die funktionalitätsspezifischen Anpassungen infolge anwendungsspezifischer Veränderungstreiber (vgl. Abschnitt 6.2.2) zu berücksichtigen sind. Aufgrund deren zeitpunktspezifischen Eintritts kann es sinnvoll sein, sich bei hoher Vielzahl an Veränderungstreibern auf ausgewählte zu beschränken und gegebenenfalls die zugewiesenen Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien hinsichtlich einer 100 %-Normierung (vgl. Abschnitt 6.2.2) anzupassen.

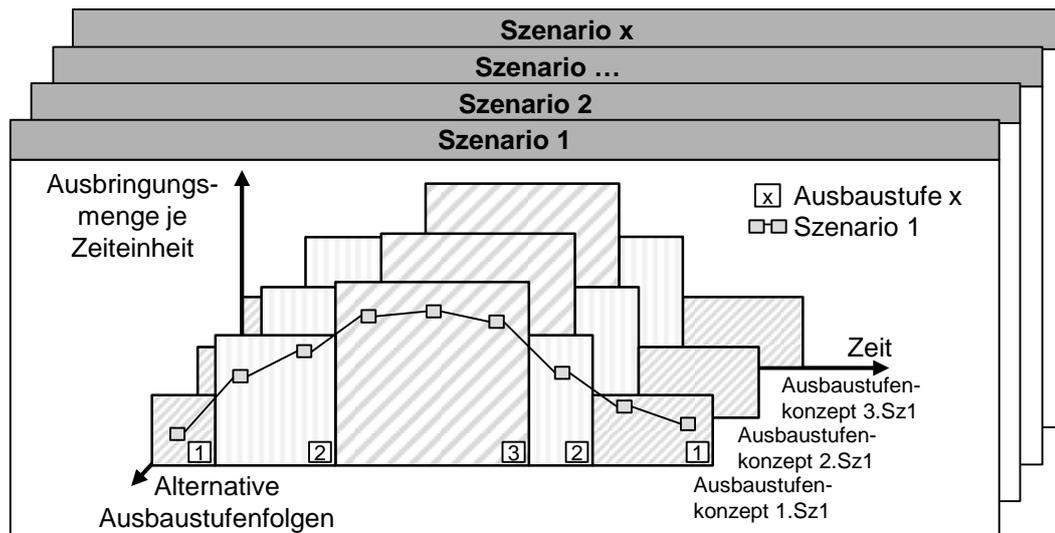


Abbildung 63: Exemplarische Ausbaustufenfolgen für ausgewählte Szenarien aufbauend auf KLUGE (2011)

Zur virtuellen und szenariospezifischen **Absicherung** von Leistungs- und Funktionsfähigkeit der stufenbezogenen Zellkonfigurationen bietet sich die simulationsgestützte Untersuchung an. Im CPPS-Kontext eignet sich insbesondere die agentenbasierte Simulation (FELDKAMP ET AL. 2019), da sich mit dieser, im Vergleich zu klassischen Simulationsansätzen, das konkrete Verhalten einzelner Systemelemente über Agenten abbilden lässt (BECKER ET AL. 2006, DECKERT & KLEIN 2010). Die agentenbasierte Simulation basiert dazu auf einer objekt-orientierten, ereignis-diskreten und dynamischen Mikro-Simulation (DAVIDSON 2001).

Zum Aufbau eines geeigneten Simulationsmodells für die Absicherung und Bewertung von Zellkonfigurationen in CPPS-Strukturen sind gängige Softwarelösungen der agentenbasierten Materialflusssimulation verwendbar, die um CPPS-spezifische Eigenschaften zu erweitern sind. Ein entsprechendes Vorgehen für Simulationsstudien, ausgehend von der Aufgabendefinition über die Modellimplementierung bis zu den eigentlichen Simulationsexperimenten, zeigt die fünfstufige methodische Vorgehensweise von VOIT ET AL. (2020a). In dieses Vorgehen gliedert sich der nachfolgend beschriebene Ablauf zur szenario- und konfigurationsbezogenen Simulation (Abbildung 64) der Fertigungszellkonfigurationen ein. Für detaillierte Ausführungen sei auf die Veröffentlichung von VOIT ET AL. (2021) verwiesen.

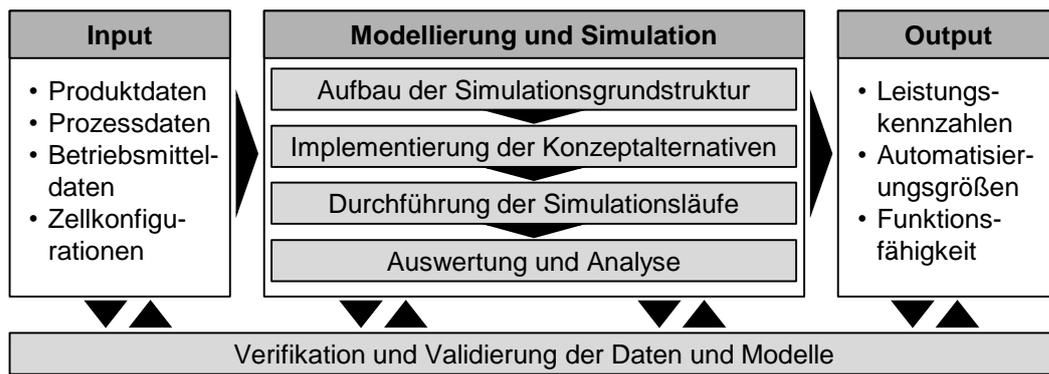


Abbildung 64: Ablauf der Simulationsdurchführung

Zentrale Grundlage der Simulationsdurchführung stellt der initiale Aufbau der Simulationsgrundstruktur in der agentenbasierten Simulation dar. Dabei sind sowohl Modellierungsbausteine zur Umsetzung modularer, skalierbarer Fertigungszellen und anlagenspezifischer Eigenschaften als auch Bewertungsbausteine für die Bestimmung von Automatisierungsgrößen und Leistungsfähigkeit vorzusehen. Anhand dessen lassen sich die konfigurationsspezifischen Konzeptalternativen im Simulationsmodell implementieren und diese wiederum für Simulationsläufe, abhängig dem ausgewählten Fertigungsprogramm je Szenario, nutzen. Folglich stehen, neben der Sicherstellung der Funktionsfähigkeit, verschiedene Leistungskennzahlen für die Auswertung und Analyse bereit. Parallel zu den einzelnen Schritten gilt es die Korrektheit von Daten und Modellen durch geeignete Techniken der Validierung und Verifikation (vgl. z. B. RABE ET AL. 2008) abzusichern.

6.4 Bewertung der Ausbaustufenkonzepte

Die finale Bewertung für die Auswahl eines der Ausbaustufenkonzepte bzw. dessen Initialkonfiguration ist unter Unsicherheit vorzunehmen, da zum Planungszeitpunkt die exakte Lebenszyklusentwicklung infolge auftretender Veränderungstreiber (vgl. Abschnitt 6.2.2) ungewiss ist. Daher werden in dieser Planungsphase die Ausbaustufenkonzepte, abhängig von den Planungszielen (vgl. Abschnitt 6.2.3), hinsichtlich deren Leistungsfähigkeit und auftretenden Kosten szenariospezifisch bewertet (vgl. Abschnitt 2.3.5). Die szenariobasierte Kosten-Leistungsbewertung orientiert sich in dessen Grundstruktur an der technisch-wirtschaftlichen Bewertung nach VDI 2225.

Im ersten Planungsschritt erfolgt demnach eine multikriterielle Leistungsbeurteilung (Abschnitt 6.4.1), um die leistungsbezogene Einzelwertigkeit je szenariospe-

zifischer Ausbaufolge eines Ausbaustufenkonzeptes zu ermitteln. Mit der anschließenden Kostenbewertung (Abschnitt 6.4.2) findet im zweiten Schritt die Bestimmung der korrespondierenden kostenbezogenen Einzelwertigkeit anhand einer szenariobasierten Lebenszykluskostenrechnung statt. Abschließend werden im dritten Planungsschritt die leistungs- und kostenbezogenen Einzelwertigkeiten zu entsprechenden Gesamtwertigkeiten der Ausbaustufenkonzepte zusammengeführt, mit dem Ziel eine vergleichende Gesamtbewertung und Auswahl (Abschnitt 6.4.3) zu ermöglichen.

6.4.1 Leistungsbewertung

Zu Beginn des Bewertungsansatzes erfolgt die Leistungsbeurteilung mit mehreren qualitativen, nicht-monetären Kriterien. Dafür eignen sich vornehmlich multikriterielle Bewertungsverfahren (vgl. Abschnitt 2.3.5). Im Folgenden wird sich an der Nutzwertanalyse nach ZANGEMEISTER (2014) orientiert und aus dem ermittelten Nutzwert die leistungsbezogene Einzelwertigkeit nach der VDI 2225 bestimmt.

Die einzelnen Ausbaustufenkonzepte lassen sich vom Planer mithilfe der erweiterten Nutzwertanalyse (Abbildung 65) quantitativ hinsichtlich der **Leistungsfähigkeit beurteilen**. Dazu sind die einzelnen Konzepte szenariospezifisch, in Form der Ausbaustufenfolgen, gegenüberzustellen und die bei der Planungszielfestlegung (vgl. Abschnitt 6.2.3) gewichteten, nicht-monetären Kriterien aufzuführen. Durch die Multiplikation des Gewichtungsfaktors mit einem auf einer Punkteskala basierenden Erfüllungsgrad kann somit der Teilnutzen jedes Kriteriums ermittelt werden. Dabei kann eine Punkteskala einen zunehmenden Punktwert beispielsweise von unbefriedigend (0 Punkte), über ausreichend (2 Punkte) bis sehr gut (4 Punkte) repräsentieren. Anschließend sind die einzelnen Teilnutzwerte zu summieren, um den szenariospezifischen Nutzwert je Ausbaustufenkonzept zu erhalten. Abschließend ist der Nutzwert durch den maximalen Punktwert zu teilen, um die leistungsbezogene Einzelwertigkeit auf einen Wert zwischen 0 und 1 zu normieren.

Szenario x								
Szenario ...								
Szenario 2								
Szenario 1								
Kriterien	Gewichtung	ASK 1		ASK 2		...	ASK m	
Kriterium 1	$GF_1 = x \%$	PW _{1,1}	TNW _{1,1}	PW _{2,1}	TNW _{2,1}	...	PW _{m,1}	TNW _{m,1}
Kriterium 2	$GF_2 = x \%$	PW _{1,2}	TNW _{1,2}	PW _{2,2}	TNW _{2,2}	...	PW _{m,2}	TNW _{m,2}
...
Kriterium n	$GF_n = x \%$	PW _{1,n}	TNW _{1,n}	PW _{2,n}	TNW _{2,n}	...	PW _{m,n}	TNW _{m,n}
Summe	GF_{ges} = 100 %	PW_{1,ges}	NW₁	PW_{2,ges}	NW₂	...	PW_{m,ges}	NW_m
Leistungsbezogene Einzelwertigkeiten		LEW_{1.Sz.1}		LEW_{2.Sz.1}		...	LEW_{m.Sz.1}	

Legende:

ASK: Ausbaustufenkonzept GF: Gewichtungsfaktor TNW: Teilnutzwert LEW: Leistungsbezog. Einzelwertigkeit
 Sz: Szenario PW: Punktwert NW: Nutzwert

Abbildung 65: Erweiterte Nutzwertanalyse zur szenariospezifischen Ermittlung von Nutzwerten und leistungsbezogenen Einzelwertigkeiten von Ausbaustufenkonzepten

Bei der kriterienbasierten Bewertung ist die Wirkung eines höheren Grades an CPPS-spezifischer Steuerungsfunktionen miteinzubeziehen. Dies kann unter anderem die kurzfristige Entscheidungsfähigkeit, Transparenz oder Prozesssicherheit fördern (vgl. Abschnitt 2.2.2) und hat demnach Einfluss auf den Erfüllungsgrad einzelner **Bewertungskriterien**, wie Flexibilität (vgl. z. B. WYCISK 2009), Wandlungsfähigkeit (vgl. z. B. SCHOLZ-REITER & SOWADE 2011) oder Transparenz (vgl. z. B. WINKLER ET AL. 2017). Folglich gilt es neben physischen auch steuerungstechnische Aspekte bei der Leistungsbeurteilung zu berücksichtigen.

6.4.2 Kostenbewertung

Nach der Leistungsbewertung folgt im zweiten Schritt die Beurteilung anhand monetärer Aspekte. Da in Bezug auf der Veränderungsfähigkeit der Ausbaustufenkonzepte eine Investitionsentscheidung unter Betrachtung des gesamten Lebenszyklus zu treffen ist, wird zur Erhebung der Kosten das Verfahren der Lebenszykluskostenrechnung in Anlehnung an die VDI 2884 und DIN EN 60300-3-3 angewandt (vgl. Abschnitt 2.3.5). Mittels der Kapitalwertmethode werden die zeitlich verteilten Lebenszykluskosten anschließend auf einen Kostenbarwert zu einem festgelegten Bezugszeitpunkt abgezinst (vgl. Abschnitt 2.3.5), bevor darauf basierend die kostenbezogene Einzelwertigkeit gemäß der VDI 2225 ermittelt wird.

Zur szenariobasierten **Kostenbewertung** für jedes Ausbaustufenkonzept dient dem Planer ein Kostenberechnungsschema (Abbildung 66). Darin werden die jährlich auftretenden Kosten einer Ausbaustufenfolge in den Lebenszyklusphasen der Entstehungs-, Nutzungs-, Rekonfigurations- und Verwertungsphase erfasst. Sobald die zeitlich verteilten Kosten vermerkt und periodengerecht aufsummiert sind, werden diese mittels Kapitalwertmethode (vgl. z. B. GÖTZE 2014) auf einen Kostenbarwert abgezinst. Abschließend wird die kostenbezogene Einzelwertigkeit aus der Division der Idealkosten durch den berechneten Kostenbarwert auf einen Wert zwischen 0 und 1 ermittelt. Die Idealkosten werden zum Beispiel durch das kostengünstigste Investitionsobjekt repräsentiert oder aus einer Marktpreisberechnung bestimmt (vgl. VDI 2225).

ASK 1 Szenario x	Lebenszyklusphase									P
	EP	NP 1	RP 1	NP 2	RP 2	...	RP z-1	NP z	VP	
ASK 1 Szenario ...	Lebenszyklusphase									P
ASK 1 Szenario 2	Lebenszyklusphase									P
ASK 1 Szenario 1	Lebenszyklusphase									P
	EP	NP 1	RP 1	NP 2	RP 2	...	RP z-1	NP z	VP	P
Kostenart 1	$K_{1,EP}$	$K_{1,NP,1}$	$K_{1,RP,1}$	$K_{1,NP,2}$	$K_{1,RP,2}$	...	$K_{1,RP,z-1}$	$K_{1,NP,z}$	$K_{1,VP}$	
Kostenart 2	$K_{2,EP}$	$K_{2,NP,1}$	$K_{2,RP,1}$	$K_{2,NP,2}$	$K_{2,RP,2}$	...	$K_{2,RP,z-1}$	$K_{2,NP,z}$	$K_{2,VP}$	P
...	
Kostenart n	$K_{n,EP}$	$K_{n,NP,1}$	$K_{n,RP,1}$	$K_{n,NP,2}$	$K_{n,RP,2}$	...	$K_{n,RP,z-1}$	$K_{n,NP,z}$	$K_{n,VP}$	
Kosten pro Jahr	$K_{ges,EP}$	$K_{ges,NP,1}$	$K_{ges,RP,1}$	$K_{ges,NP,2}$	$K_{ges,RP,2}$	...	$K_{ges,RP,z-1}$	$K_{ges,NPz}$	R	
Kostenbarwert	KBW_{1,Sz,1}									
Kostenbezogene Einzelwertigkeit	KEW_{1,Sz,1}									

Legende:

ASK: Ausbaustufenkonzept	R: Restwert	EP: Entstehungsphase	RP: Rekonfigurationsphase
Sz: Szenario	K: Kosten	NP: Nutzungsphase	VP: Verwertungsphase
KBW: Kostenbarwert	KEW: Kostenbezogene Einzelwertigkeit		

Abbildung 66: Kostenberechnungsschema zur szenariospezifischen Ermittlung der Lebenszykluskosten und kostenbezogenen Einzelwertigkeiten für ein Ausbaustufenkonzept

Neben direkt zurechenbaren Produktionsmittelkosten, wie Anschaffungspreis oder Wartungsaufwand (vgl. z. B. VDI 2884), sind auch die **Kostenarten** in indirekten Produktionsbereichen für beispielsweise Layoutplanung oder Personaleinsatzsteuerung (vgl. z. B. KLUGE 2011) zu berücksichtigen. Zur Umsetzung CPPS-spezifischer Anwendungen fallen dabei gesonderte Kosten an. Zu diesen Kosten gehören u. a. Kosten für IT-Infrastruktur (z. B. Cloudbasierte IT-Architektur), Betriebsmit-

tel (CPPS-fähige Betriebsmittel), Software (z. B. intelligente Algorithmen für Informationsverarbeitung) oder Initialisierung bzw. Betrieb (z. B. Experten mit ausgeprägter Qualifizierung für Trainingsphasen oder Cyber-Security).

6.4.3 Gesamtbewertung und Auswahl

Im letzten Schritt findet, basierend auf den szenariospezifischen Einzelwertigkeiten zu Leistungsfähigkeit und Kosten, eine abschließende Gesamtbewertung der Ausbaustufenkonzepte statt, um ein geeignetes Konzept bzw. dessen Initialkonfiguration auszuwählen. Zu diesem Zweck werden zunächst die Einzelwertigkeiten zu kosten- und leistungsbezogenen Gesamtwertigkeiten jedes Konzeptes zusammengeführt, bevor eine vergleichende Gegenüberstellung und Einordnung der Konzeptalternativen zur Entscheidungsfindung führt.

In Anlehnung an ALDINGER (2009) und KLUGE (2011) erfolgt mithilfe eines Scoring-Verfahrens (Abbildung 67) die Zusammenführung der Einzel- zu **Gesamtwertigkeiten**. Dazu werden für jedes Ausbaustufenkonzept die Einzelwertigkeiten mit den szenariospezifischen Eintrittswahrscheinlichkeiten (vgl. Abschnitt 6.2.2 und 6.3.3) multipliziert und entsprechend aufsummiert, so dass die kosten- bzw. leistungsbezogene Gesamtwertigkeit einen Wert zwischen 0 und 1 aufweist.

Szenario		ASK 1		ASK 2		...	ASK m	
Nr.	P	LW	KW	LW	KW	...	LW	KW
1	$P_{S_{z,1}}$	$LEW_{1,S_{z,1}}$	$KEW_{1,S_{z,1}}$	$LEW_{2,S_{z,1}}$	$KEW_{2,S_{z,1}}$	...	$LEW_{m,S_{z,1}}$	$KEW_{m,S_{z,1}}$
2	$P_{S_{z,2}}$	$LEW_{1,S_{z,2}}$	$KEW_{1,S_{z,2}}$	$LEW_{2,S_{z,2}}$	$KEW_{2,S_{z,2}}$	...	$LEW_{m,S_{z,2}}$	$KEW_{m,S_{z,2}}$
...
x	$P_{S_{z,x}}$	$LEW_{1,S_{z,x}}$	$KEW_{1,S_{z,x}}$	$LEW_{2,S_{z,x}}$	$KEW_{2,S_{z,x}}$	...	$LEW_{m,S_{z,x}}$	$KEW_{m,S_{z,x}}$
Gesamt		LGW₁	KGW₁	LGW₂	KGW₂	...	LGW_m	KGW_m

Legende:

ASK: Ausbaustufenkonzept LEW: Leistungsbezogene Einzelwertigkeit LGW: Leistungsbezog. Gesamtwertigkeit
 Sz: Szenario KEW: Kostenbezogene Einzelwertigkeit KGW: Kostenbezog. Gesamtwertigkeit
 P: Eintrittswahrscheinlichkeit LW: Leistungswertigkeit KW: Kostenwertigkeit

Abbildung 67: Scoring-Verfahren zur Ermittlung der kosten- und leistungsbezogenen Gesamtwertigkeit von Ausbaustufenkonzepten

Aufbauend auf den ermittelten Gesamtwertigkeiten findet in Anlehnung an VDI 2225 und RUDTSCH (2016) die Gegenüberstellung der Konzeptalternativen mittels eines Kosten-Leistungswertigkeits-Portfolio (Abbildung 68) statt. Darin werden die Alternativen entsprechend deren leistungsbezogenen Gesamtwertigkeit auf der horizontalen Achse und deren kostenbezogenen Gesamtwertigkeit auf

der vertikalen Achse aufgetragen. Anhand der Einordnung in einen der vier Quadranten lässt sich somit vergleichend beurteilen, ob ein Konzept leistungs- und kostenmäßig geeignet (rechts oben) oder ungeeignet (links unten) bzw. lediglich leistungsmäßig gut (rechts unten) oder nur kostengünstig (links oben) ist. Dementsprechend sind bei der **Auswahl**entscheidung für ein Ausbaustufenkonzept bzw. dessen Initialkonfiguration diejenigen im rechts oberen Quadranten grundsätzlich zu präferieren.

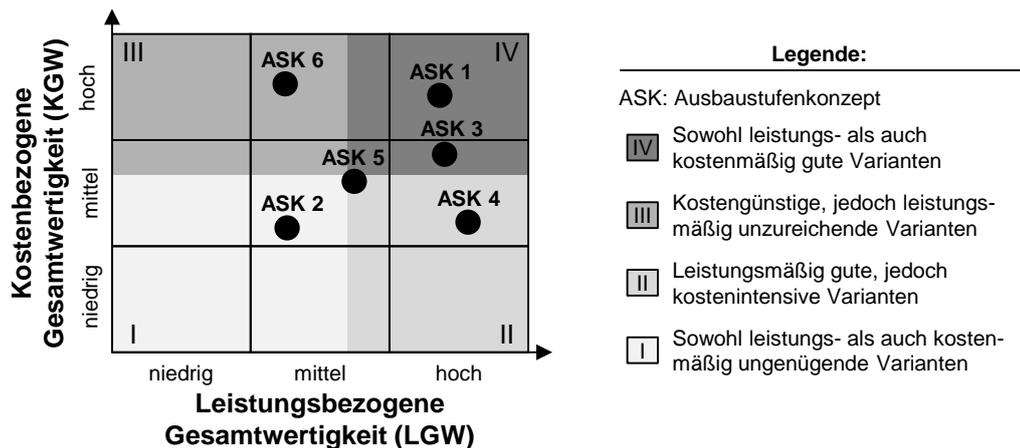


Abbildung 68: Kosten-Leistungswertigkeits-Portfolio zur Gegenüberstellung alternativer Ausbaustufenkonzepte

6.5 Fazit

Dieses Kapitel befasste sich mit der Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen, das in drei Planungsphasen untergliedert wurde. Für die erste Phase wurde ein dreistufiger Ansatz zur Analyse planungsrelevanter Rahmenbedingungen erarbeitet, mit dem die grundlegenden Randbedingungen, lebenszyklusbezogenen Planungsanforderungen und Planungsziele definierbar sind. Um die darauf aufbauende systematische Gestaltung von alternativen Ausbaustufenkonzepten zu ermöglichen, wurde die zweite Phase ebenfalls in drei Planungsschritte strukturiert. So lassen sich damit, beginnend mit der Festlegung von Ausbaustufen und prinzipiellen Veränderungsstrategien, gezielt alternative Ausbaustufenkonzepte unter Einsatz der Konfigurationsmodellierung erarbeiten und daraus szenariospezifische Ausbaustufenfolgen ableiten und virtuell absichern. Im Hinblick auf die abschließende Auswahl eines präferierten Ausbaustufenkonzepts wurde für die dritte Phase ein kosten- und leistungsbezogener Bewertungsansatz ausgearbeitet, der die szenariospezifischen Ausbaustufenfolgen berücksichtigt.

7 Anwendung und Bewertung der Methodik

Dieses Kapitel legt die Anwendung und Beurteilung der entwickelten Methodik zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen dar. Zunächst erfolgt die Darstellung des Anwendungsfalls (Abschnitt 7.1) mit einem ausgewählten Beispiel aus der additiven Fertigung. Im Kontext des Anwendungsbeispiels wird anschließend die Anwendung der entwickelten Methodik (Abschnitt 7.2) aufgezeigt, bevor die Bewertung der Methodik (Abschnitt 7.3) anhand der definierten Anforderungen (vgl. Abschnitt 4.1), einer wirtschaftlichen Aufwand-Nutzen-Betrachtung und einer kritischen Reflexion vorgenommen wird.

7.1 Beschreibung des Anwendungsfalls

Die Evaluierung der Planungsmethodik erfolgt anhand eines Anwendungsbeispiels des Forschungsprojekts „FaPlaMult“ (vgl. VOIT ET AL. 2020c, 2021) das im Rahmen des Vorhabens „MULTIMATERIAL-Zentrum Augsburg“ durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi) gefördert wurde. Das übergeordnete Projektziel stellt die Planung einer flexiblen Fertigungsfabrik zur Herstellung individualisierter Metallbauteile mit dem pulverbasierten, metallischen Laserstrahlschmelzen, in Englisch Laser Beam Melting (LBM), dar. Um dabei das vorhandene Potenzial des LBM-Verfahrens (vgl. z. B. VDI 3405) für die individuelle Serienfertigung auszuschöpfen, wird insbesondere die Automation entlang der LBM-Prozesskette betrachtet.

Das Anwendungsbeispiel der vorliegenden Forschungsarbeit konzentriert sich in diesem Zusammenhang auf die Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen für die dem LBM-Verfahren nachgelagerten Prozesse Entpulverung und geometrische Bauteilprüfung. Nachfolgend wird dazu das Anwendungsszenario (Abschnitt 7.1.1), betrachtete Fertigungssystem (Abschnitt 7.1.2) und die relevanten Produktionsprozesse (Abschnitt 7.1.3) vorgestellt.

7.1.1 Anwendungsszenario

Das Anwendungsszenario befasst sich mit der Planung eines Fertigungssystems zur Kleinserienfertigung von 3D-gedruckten Metallbauteilen. Im Fokus der Betrachtung steht das **Werkstückspektrum** bestehend aus einer Vielzahl an individualisierten, additiv gefertigten Metallbauteilen mit komplexen dreidimensionalen Strukturen (z. B. labyrinthartige Innenkanäle, stochastische Gitter- oder nicht

stochastische Schwammstrukturen). Die individualisierten Bauteile einer Bauteilfamilie für z. B. Wärmetauscher oder Gasturbinen-Brennerspitzen (vgl. z. B. BIEDERMANN ET AL. 2018) sind in Form von Bauteilstrukturvarianten (vgl. Abschnitt 5.1.1) charakterisiert und als Feature-basierte 3D-Modelle in CAD-Programmen vorhanden.

Aufgrund der hohen Produktindividualität und eines stark zukunftssträchtigen Branchenumfelds (vgl. WOHLERS ET AL. 2022) ist die **Entwicklung** des Fertigungsprogramms in Bezug auf Stückzahl und Bauteilvariantenmix über den Zeitverlauf schwer prognostizierbar. Diesbezüglich ist mit szenariospezifisch unterschiedlichen Prognosen bei anfänglich eher geringeren Ausbringungsmengen umzugehen sowie mit vermehrten Anpassungen während des Lebenszyklus des Fertigungssystems zu rechnen. Ferner werden entlang der additiven Prozesskette, neben nicht automatisierten Lösungen, zunehmend neuartige Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze durch eine Vielzahl von Unternehmen entwickelt und eingeführt (vgl. z. B. LANZA ET AL. 2017, GEBHARDT 2018, VDMA 2021). Durch eine abgestimmte und koordinierte Entwicklung über Unternehmensgrenzen hinweg entsteht dabei ein durchgängiges CPPS-basiertes Ökosystem für die additive Fertigung (vgl. z. B. EMMELMANN ET AL. 2017, KINSCHERL 2018, VDMA 2021).

Das beschriebene Anwendungsszenario bildet repräsentativ die Herausforderungen bei der Planung veränderungsfähiger Fertigungssysteme mit CPPS-Strukturen für die individualisierte Serienfertigung ab. Die entwickelte Methodik (vgl. Abschnitt 4.2) soll in diesem Kontext den Produktionssystemplaner bei der Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen unterstützen, um eine hohe Planungsqualität und Zielerfüllung sicherzustellen.

7.1.2 Betrachtetes Fertigungssystem

Zur Herstellung der individualisierten Metallbauteile dient das LBM-Verfahren, dem entlang der Prozesskette (Abbildung 69) diverse Prozesse vor- (Pre-Prozess) und nachgelagert (Post- und nachgelagerte Prozesse) (vgl. z. B. MÖHRLE 2018, VOIT ET AL. 2020c) sind. Das betrachtete **Fertigungssystem** mit CPPS-Strukturen besteht dazu aus mehreren entkoppelten Fertigungszellen, die die intelligenten Bauteile entlang des auftragsspezifischen Materialflusses ohne festgelegten Takt durchlaufen. Die Bauteile vernetzen sich dazu mit den Produktionsressourcen und tauschen Daten aus. Entsprechend den wachsenden Anforderungen und der Entwicklung neuartiger Technologien (vgl. Abschnitt 7.1.1) wird der bedarfsgerechte Ausbau zum vernetzten und digitalisierten Fertigungssystem angestrebt.

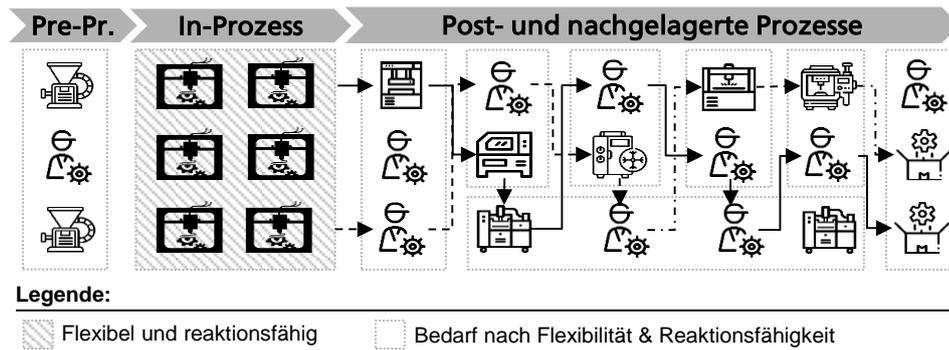


Abbildung 69: Schematische LBM-Prozesskette des Fertigungssystems

Als CPPS-basiertes **Steuerungs- und Kommunikationssystem** (vgl. Abschnitt 2.2.3) dient MindSphere[®], das offene, cloudbasierte Internet of Things-Betriebssystem (IoT-Betriebssystem) des Herstellers Siemens AG. Es ermöglicht die industrielle, herstellerunabhängige Kommunikation und Vernetzung intelligenter Objekte sowie die Realisierung und Umsetzung CPPS-spezifischer Anwendungen (vgl. z. B. WEGENER 2019). Ebenso ist das IoT-Betriebssystem mit weiteren unternehmensspezifischen IT-Systemen wie ERP, MES oder PLM bezüglich des Informationsaustausches vernetzt, wodurch die umfassende Datennutzung über IT-Systemgrenzen hinweg gewährleistet ist (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die über die gesamte Wertschöpfungskette durchgängig erforderlichen Daten und digitalen Informationsmodelle zu Produkt, Produktionsprozess und -ressource sind in der Digital Enterprise Suite[®] von Siemens abgebildet, softwaregestützt nutzbar und in einem integrierten Datenmodell basierend auf der PLM-Software Teamcenter[®] miteinander verknüpft (vgl. z. B. KINSCHERL 2018, WEGENER 2019, BUTSCHEK 2020).

7.1.3 Betrachtete Produktionsprozesse

Im Anwendungsfall wird sich bei der Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen auf die dem LBM-Verfahren nachgelagerten **Wertschöpfungsschritte** „Bauteil entpulvern“ und „Geometrische Bauteilqualität sichern“ fokussiert. Dabei gilt es das überschüssige und anhaftende Restpulver, insbesondere aus den Kavitäten im Inneren der komplexen Metallbauteile, zu entfernen sowie die geometrische Form der additiv aufgebauten Bauteile vor deren Weiterbearbeitung in den darauf anschließenden Wertschöpfungsschritten qualitativ abzusichern. Für die Prozessausführung innerhalb von Fertigungszellen stehen verschiedene Betriebsmittel zur Verfügung. Diese Betriebsmittel besitzen unterschiedliche Automatisierungsstufen, CPPS-spezifische Steuerungseigenschaften oder modulare Aufbauweisen.

Bei der Entpulverung sind, neben manuellen und mechanischen Reinigungskabinen, automatisierte Entpulverungsanlagen (Abbildung 70) zum Beispiel des Herstellers Solukon Maschinenbau GmbH (vgl. SOLUKON 2021) einsetzbar. Die in unterschiedlichen Ausführungen erhältlichen **Anlagen** basieren auf den Prinzipien des gezielten Schwenkens und der Vibration und lassen sich standartmäßig programmieren oder über Joy-Stick bedienen. Daneben besteht bei ausgewählten Anlagenmodellen die Möglichkeit zum regelbasiert automatisierten Entpulvern durch den Einsatz einer algorithmusbasierten Steuerungssoftware für bauteilkonturnahes Schwenken. Ebenso lässt sich eine Funktionserweiterung durch die Integration in ein CPPS-basiertes Steuerungs- und Kommunikationssystem erzielen, wodurch die automatische Beladung sowie anderweitige CPPS-spezifische Anwendungen für z. B. Instandhaltung oder Qualitätssicherung umsetzbar sind (SOLUKON 2021). Ähnlich verhält es sich sowohl bei der geometrischen Formprüfung, bei der beispielsweise taktile oder optische Messsysteme zum Einsatz kommen, als auch bei der Ausführung von Transport- und Handhabungsvorgängen durch z. B. Roboter oder fahrerlose Transportsysteme.

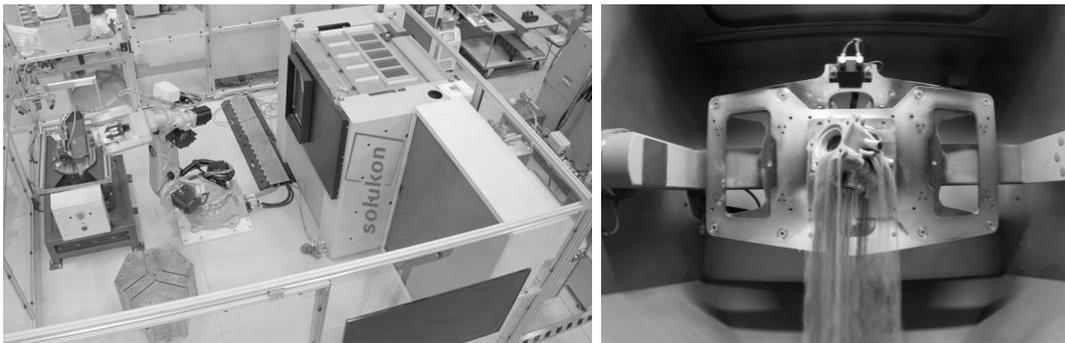


Abbildung 70: Beispiel einer Fertigungszelle mit automatisierter Entpulverungsanlage (Bilder: Solukon Maschinenbau GmbH®)

Automatisierte Entpulverungssysteme sowie einzelne CPPS-spezifische Anwendungen wurden unter anderem als prototypische oder seriennahe CPPS-Demonstratoren im Rahmen von Forschungsprojekten, wie „HyProCell“ (vgl. PEREIRA ET AL. 2021) oder „NextGenAM“ (vgl. ANDERHOFSTADT & DISSELKAMP 2022) realisiert. Für das Planungsvorhaben in dieser Forschungsarbeit wird vorausgesetzt, dass die technologische Reife für die industrielle Anwendung grundsätzlich gegeben ist und Betriebsmittel mit entsprechenden IuK-Technologien in das vorhandene CPPS-Netzwerk des Fertigungssystems integrierbar sind. Durch die projekt- und anforderungsspezifische Zusammenstellung der Betriebsmittel lassen sich demnach modulare, skalierbare Fertigungszellen für das betrachtete Fertigungssystem mit CPPS-Strukturen (vgl. Abschnitt 7.1.2) planen.

7.2 Anwendung der Methodik

Für den beschriebenen Anwendungsfall findet gemäß des methodischen Planungsvorgehens (vgl. Kapitel 6) die Anwendung der Methodik (vgl. Abschnitt 4.2) einschließlich der modellbasierten Deskription und Konfiguration (vgl. Kapitel 5) statt. Demnach erfolgt zunächst die Analyse der Rahmenbedingungen (Abschnitt 7.2.1), bevor darauf aufbauend die Gestaltung alternativer Ausbaustufenkonzepte (Abschnitt 7.2.2) vollzogen wird. Die abschließende Auswahl einer geeigneten Konzeptalternative bzw. deren Initialkonfiguration wird anhand einer kosten- und leistungsbezogenen Bewertung (Abschnitt 7.2.3) vorgenommen.

7.2.1 Analyse der Rahmenbedingungen

In der ersten Planungsphase erfolgte die Analyse der Rahmenbedingungen (vgl. Abschnitt 6.2). Dazu wurden die Randbedingungen (Abschnitt 7.2.1.1), Planungsanforderungen (Abschnitt 7.2.1.2) und -ziele (Abschnitt 7.2.1.3) betrachtet.

7.2.1.1 Betrachtung der Randbedingungen

Mit dem ersten Schritt (vgl. Abschnitt 6.2.1) fand die anwendungsfallspezifische Betrachtung grundlegender **Prämissen** des Planungsvorhabens (vgl. Abschnitt 7.1) und der damit einhergehende Nachweis des zweckmäßigen Einsatzes der erarbeiteten Methoden und Modelle statt. Dabei zeigte sich, dass hinsichtlich des betrachteten Fertigungssystems (vgl. Abschnitt 7.1.2) zum einen Bedarf an Veränderungsfähigkeit bei der lebenszyklusorientierten Planung von Fertigungszellen besteht und zum anderen die CPPS-spezifischen Voraussetzungen in Form organisatorischer und technischer Aspekte (vgl. Abschnitt 6.2.1) gegeben sind. Konkrete projektspezifische Vorgaben folgen in den weiteren Planungsschritten.

7.2.1.2 Präzisierung der Planungsanforderungen

Im zweiten Schritt fand zur Präzisierung der Planungsanforderungen die Aufbereitung der Eingangsinformationen der Methodik statt. Dazu wurde der Veränderungsraum anhand den Veränderungsdimensionen (vgl. Abschnitt 6.2.2) aufgespannt.

Als wesentliche Grundlage wurde die lebenszyklusbezogene Entwicklung des **Fertigungsprogramms** (Abbildung 71) mit den jährlichen Stückzahlen je Bau-

teilstrukturvarianten über einen Zeithorizont von acht Jahren in einem pessimistischen (Szenario 1), wahrscheinlichen (Szenario 2) und optimistischen (Szenario 3) Szenario für den Anwendungsfall (vgl. Abschnitt 7.1.1) aufbereitet. Die Eintrittswahrscheinlichkeit beträgt beim zweiten Szenario 60 % und bei den beiden weiteren je 20 %. Während dem zweiten und dritten Szenario ein starker Anstieg der initialen Anfangsstückzahlen zugrunde liegt, wird im ersten Szenario von einem relativ späten und moderaten Anstieg der Ausbringungsmenge ausgegangen.

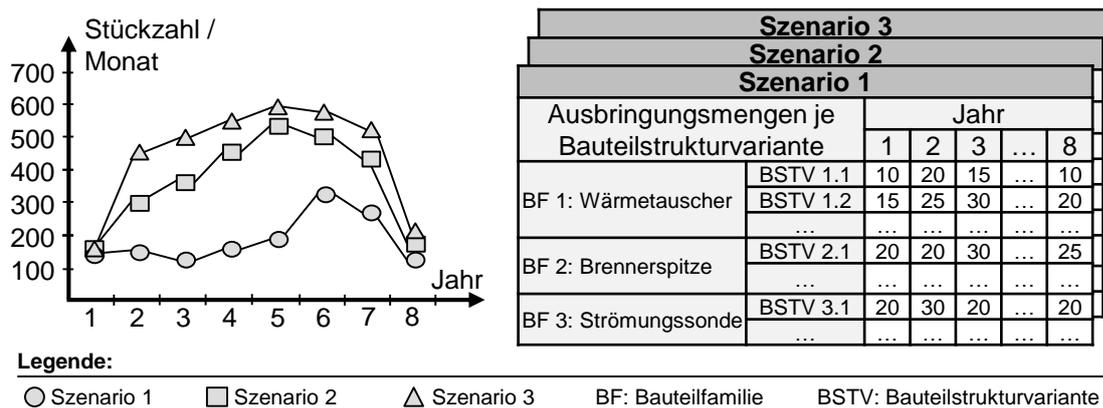


Abbildung 71: Szenariobasierte Entwicklung des Fertigungsprogramms

Darüber hinaus erfolgte die Beurteilung **anwendungsfallspezifischer Veränderungstreiber** mittels des Veränderungsdimensionenkatalogs (vgl. Abschnitt 6.2.2). Im konkreten Fall wurde beispielsweise in der Veränderungsdimension Produkt über die Bauteilfamilienstrukturmatrix (vgl. Abschnitt 5.1.1) determiniert, dass ein zusätzlicher Bauteilwerkstoff ab dem vierten Jahr für das dritte Szenario zu berücksichtigen ist. Weiterhin wurde zum Beispiel in der Veränderungsdimension Technologie der Release neuer steuerungstechnischer Anlagenfunktionen der Entpulverungsanlagen von Solukon in Form der algorithmusbasierten Steuerungssoftware (vgl. Abschnitt 7.1.3) szenarienunabhängig und mit hoher Wahrscheinlichkeit ab dem zweiten Jahr festgehalten.

7.2.1.3 Festlegung der Planungsziele

Der dritte Schritt diente zur Festlegung der Planungsziele. Dabei galt es die relevanten **Zielkriterien** basierend auf dem Zielsystem (vgl. Abschnitt 6.2.3) zu definieren. Neben Muss- (z. B. maximales Investitionsbudget, verfügbare Fläche) und Kann-Kriterien (z. B. geringer Umbauaufwand) wurden damit die Soll-Kriterien für die finale Bewertung der geplanten Konzeptalternativen bestimmt. Zur Gewichtung der Soll-Kriterien entsprechend deren gegenseitigen Relevanz für das

Planungsvorhaben diente eine Präferenzmatrix (Abbildung 72), wobei die Bearbeitungsflexibilität und der Rekonfigurationsgrad die höchste Wichtigkeit haben.

Präferenzmatrix										
Zielkriterien	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	Summe	Gewichtung	Rang
K ₁ Bearbeitungsflexibilität		2	1	2	2	2	2	11	27,5 %	1
K ₂ Rekonfigurationsgrad	0		1	2	2	2	2	9	22,5 %	2
K ₃ Implementierungsaufwand	0	1		0	2	1	1	5	12,5 %	4
K ₄ Prozesstransparenz	0	0	2		1	2	1	6	15,0 %	3
K ₅ Flächenbedarf	0	0	0	0		1	0	1	2,5 %	7
K ₆ Innovationsgrad	0	0	1	0	1		1	3	7,5 %	6
K ₇ Kostenflexibilität	0	0	1	1	2	1		5	12,5 %	4
Summe								40	100 %	

Legende:

Zeile ist ... 0: unwichtiger 1: gleichwichtig 2: wichtiger ... als Spalte

Abbildung 72: Präferenzmatrix zur Gewichtung ausgewählter Soll-Kriterien

7.2.2 Gestaltung der Ausbaustufenkonzepte

Mit der zweiten Planungsphase erfolgte basierend auf den analysierten Rahmenbedingungen die Gestaltung der Ausbaustufenkonzepte (vgl. Abschnitt 6.3). Dazu wurden, entsprechend festgelegter Veränderungsstrategien (Abschnitt 7.2.2.1) und unter Zuhilfenahme der auf dem PPR-Modell basierenden Konfigurationsmodellierung (vgl. Kapitel 5), verschiedene Fertigungszellkonfigurationen zu den Konzepten erarbeitet (Abschnitt 7.2.2.2) und davon szenariospezifische Ausbaustufenfolgen (Abschnitt 7.2.2.3) abgeleitet.

7.2.2.1 Definition der Veränderungsstrategie

Im ersten Schritt wurde die Veränderungsstrategie für den stufenweisen Ausbau der zu planenden modularen, skalierbaren Fertigungszellen anhand der Festlegung von Ausbaustufen und prinzipieller Veränderungsstrategien (vgl. Abschnitt 6.3.1) definiert. Für die zu planenden Zellkonfigurationen eines Ausbaustufenkonzeptes erfolgte die Festlegung von drei **Ausbaustufen** (Abbildung 73), wobei jede Stufe einen Bereich mit maximaler Ausbringungsmenge je Monat repräsentiert. Die erste Ausbaustufe orientiert sich dabei an dem Anfangsbereich mit einer Ausbringungsmenge von bis zu 200 Stück pro Monat. Die zweite Ausbaustufe bildet den mittleren Bereich mit max. 400 Stück pro Monat ab, während der Maximalbereich für eine Ausbringungsmenge mit bis zu 600 Stück pro Monat durch die dritte Ausbaustufe repräsentiert ist. Je nach vorliegendem Szenario ist dabei ersichtlich, zu welchem Zeitpunkt es in welche Ausbaustufe zu wechseln gilt.

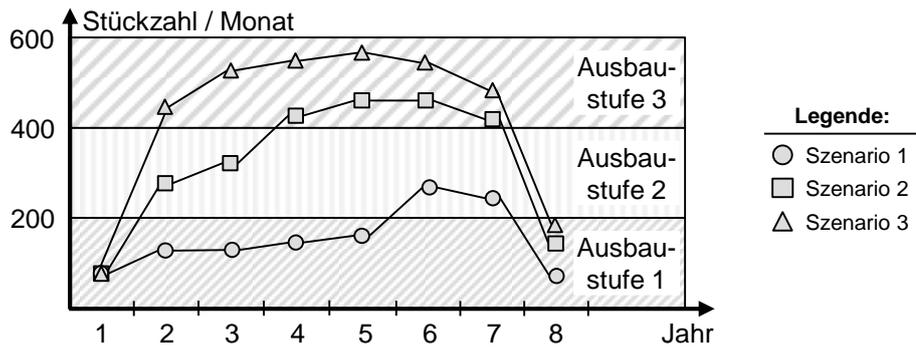


Abbildung 73: Definierte Ausbaustufen

Basierend auf den Ausbaustufen und festgelegten Rahmenbedingungen (vgl. Abschnitt 7.2.1) wurden **prinzipielle Veränderungsstrategien** für drei Konzeptalternativen festgelegt, um eine möglichst differenzierte Bandbreite an Lösungen zu erhalten. Die Strategie hinter dem ersten Ausbaustufenkonzept verfolgt die Anpassung der stufenbezogenen Zellkonfigurationen anhand der inkrementellen Veränderung des Automatisierungsgrads, wobei keine Anbindung der eingesetzten Betriebsmittel ins CPPS-Netzwerk stattfindet. Mit dem zweiten Konzept wird die Parallelisierung bzw. Variation der Anzahl von Station und Zelle fokussiert, ohne deren Automatisierungs- oder Intelligenzgrad anzupassen. Das dritte Konzept beabsichtigt vornehmlich die CPPS-basierte Anpassung von Automatisierungs- und Intelligenzgrad. Zudem gilt es konzeptunabhängig sowohl das Schichtmodell (Drei-Schicht-Betrieb) als gegeben anzunehmen als auch anwendungsspezifischen Veränderungstreibern vornehmlich über die gewählten Flexibilitäten anstatt über Funktionalitätsänderungen zu begegnen.

7.2.2.2 Erarbeitung alternativer Ausbaustufenkonzepte

Im zweiten Schritt wurden auf Basis der definierten Ausbaustufen und prinzipiellen Veränderungsstrategien alternative Ausbaustufenkonzepten mit stufenbezogenen Zellkonfigurationen konzipiert (vgl. Abschnitt 6.3.2). Die Erarbeitung der Zellkonfigurationen zu den drei **Ausbaustufenkonzepten** (Abbildung 74) startete beim zweiten Konzept aufgrund der einfacheren Veränderungsstrategie mit der ersten Ausbaustufe als Basisstufe, während beim ersten und dritten Konzept mit der dritten Ausbaustufe als Basisstufe begonnen wurde. Somit ließ sich bei beiden letztgenannten das automatisierungs- bzw. intelligenzbezogene Ausbaupotenzial der Betriebsmittel bereits in den Zellkonfigurationen der niedrigeren Ausbaustufen berücksichtigen. Weiterhin sind neben den primären, konzeptbezogenen Ausbaupfaden auch alternative, konzeptübergreifende Ausbaupfade umsetzbar.

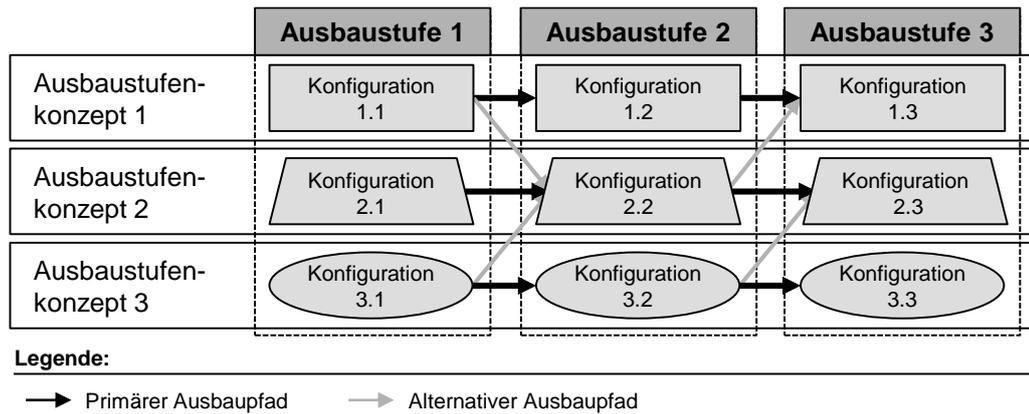


Abbildung 74: Ausbaustufenkonzepte mit deren stufenbezogenen Zellkonfigurationen und Ausbaupfaden

Die Erarbeitung der stufenbezogenen Zellkonfigurationen beruht auf der PPR-Datenmodell basierenden Konfigurationsmodellierung (vgl. Kapitel 5). Hierfür wurde auf Betriebsmittelsteckbriefe zurückgegriffen, die aus einer im Forschungsprojekt (vgl. Abschnitt 7.1) angelegten Ressourcenbibliothek (vgl. VOIT ET AL. 2020c) abgeleitet sind. Im Nachfolgenden wird zunächst die Anwendung des Konfigurationsmodellierung mit dessen fünf Konfigurationsbausteinen (vgl. Abschnitt 5.2) an der dritten Ausbaustufe des dritten Ausbaustufenkonzepts exemplarisch dargelegt, bevor auf die beiden weiteren Ausbaustufen und die anderen beiden Ausbaustufenkonzepte eingegangen wird.

Konfigurationsbaustein 1: Fertigungszellstrukturierung

Zur Konzipierung von Zellkonfigurationen der dritten Ausbaustufe (Basisstufe) erfolgte zuerst die Festlegung der funktionalen Grundstruktur (vgl. Abschnitt 5.2.1). Als CPPS-spezifische Anwendung wurde dabei abhängig von der prinzipiellen Veränderungsstrategie die Realisierung einer selbststeuernden, automatisierten Fertigungszellkonfiguration vorgesehen. Zur Erarbeitung der entsprechenden Funktionsstruktur wurden die technologischen Primär- und Sekundärprozesse für die Entpulverung und geometrische Bauteilformprüfung fähigkeitsbasiert bestimmt, in eine Petri-Netz-basierte Prozessabfolge überführt und nach Stationen bzw. Stationsmodulen in einem Strukturkonfigurationsmodell (Abbildung 75) gruppiert. In diesem Modell sind entsprechend der CPPS-spezifischen Anwendung die steuerungsspezifischen Randbedingungen in Form der Automatisierungs- und CPPS-Leistungsstufen stationsbezogen festgelegt und die zugehörigen Stationsmodule mithilfe der Ausprägungen hinsichtlich des Automatisierungs- und Intelligenzprofils determiniert.

Stationsmodule	Transportmodul (TM)										
	Zuführmodul (ZM)										
Fertigungsmodul (FM)											
Zellstruktur	A	Station 1: Reinigung									
			AU	• Bewegen • Sichern							III
			SK	• Ausklopfen							
		Station 2: Kontrolle									
			AU	• Bewegen • Sichern							III
	SK	• Form prüfen • Oberflä. prüfen									

Legende:

nicht automatisiert	nicht intelligent	CPPS-Leistungsstufe	Konzept 3.3
automatisiert	intelligent	Automatisierungsleistungsstufe	

Abbildung 75: Grundstruktur der Basisstufe des dritten Ausbaustufenkonzeptes

Konfigurationsbaustein 2: Betriebsmitteleignungsabgleich

Aufbauend auf der funktionalen Grundstruktur und den Prozessanforderungen erfolgte die Auswahl der Betriebsmittelsteckbriefe hinsichtlich deren technologischen und steuerungstechnischen Eignung mithilfe des PPR-Eignungsabgleichs (vgl. Abschnitt 5.2.2). Entsprechend fand dabei zunächst der Abgleich der erforderlichen Fähigkeiten der Prozessfolge mit den verfügbaren Fähigkeiten der Betriebsmittel statt. Die dabei erhaltene Vorauswahl an technologisch geeigneten Betriebsmitteln wurde wiederum hinsichtlich der steuerungstechnischen Anforderungen modulspezifisch eingegrenzt, ehe der Abgleich der werkstück- bzw. prozessrelevanten Merkmale mit den vorhandenen Ressourcenmerkmalen erfolgte. Die auf diese Weise durchgeführte Selektion an technologisch und steuerungstechnisch geeigneten Betriebsmitteln je Fähigkeit lieferte eine Übersicht an möglichen Betriebsmitteln mit deren modularen Aufbauweisen (Abbildung 76). Beispielsweise liegt für die Fähigkeit Bewegen ein Handhabungsroboter, eine Transport- oder Roboterplattform sowie eine Entpulverungsanlage mit integriertem Materialschleusemodul vor.

Betriebsmittel		BM-Konf.	Betriebsmittelmodule		Fähigkeiten
BM1	Intelligente Entpulverungsanlage	BMK _{1,1}	M ₁	Entpulverungsanlage	Mech. Reinigen (Ausklopfen)
		BMK _{1,2}	M ₁ M ₂	Entpulverungsanlage Materialschleuse	Mech. Reinigen (Ausklopfen) Bewegen (Führen)
BM2	Intelligente Inspektionsanlage	BMK _{2,1}	M ₃	Optische Messanlage	Kontrollieren (Form, Oberfl. prüfen)
BM3	Intelligente, robotergestützte Inspektionsanlage	BMK _{3,1}	M ₄ M ₅	Knickarmroboter Optisches Messsystem	Bewegen (Positionieren) Kontrollieren (Form, Oberfl. prüfen)
		BMK _{3,2}	M ₄ M ₆	Knickarmroboter Taktils Messsystem	Bewegen (Positionieren) Kontrollieren (Form, Oberfl. prüfen)
BM4	Intelligenter Handhabungsroboter	BMK _{4,1}	M ₅ M ₆	Knickarmroboter Endeffektor	Bewegen (Positionieren) Sichern (Ent-, Spannen)
		BMK _{4,2}	M ₅ M ₆ M ₇	Knickarmroboter Endeffektor Verfahrachse	Bewegen (Positionieren) Sichern (Ent-, Spannen) Bewegen (Fördern)
BM5	Intelligente Transportplattform	BMK _{5,1}	M ₈	Transportplattform	Bewegen (Fördern)
		BMK _{5,2}	M ₈ M ₉	Transportplattform Hubeinrichtung	Bewegen (Fördern) Bewegen (Führen)
BM6	Mobile Roboterplattform	BMK _{6,1}	M ₁₀ M ₁₁ M ₁₂	Transportplattform Leichtbauroboter Endeffektor	Bewegen (Fördern) Bewegen (Positionieren) Sichern (Ent-, Spannen)
		BMK _{6,2}	M ₁₀ M ₁₃ M ₁₄	Transportplattform Knickarmroboter Endeffektor	Bewegen (Fördern) Bewegen (Positionieren) Sichern (Ent-, Spannen)

Legende:

BM i: Betriebsmittel i BMK_{ij}: Betriebsmittelkonfiguration j von Betriebsmittel BM i M_j: Modul von Betriebsmittel BM i

Abbildung 76: Auszug möglicher Betriebsmittel mit deren modularen Aufbauweisen und Fähigkeiten

Konfigurationsbaustein 3: Zellkonfigurationskomposition

Aufbauend auf der Grundstruktur und den möglichen Betriebsmitteln erfolgte die Zellkonfigurationskomposition (vgl. Abschnitt 5.2.3) zur Erarbeitung technischer Zellkonfigurationsvarianten. Dementsprechend wurde zunächst die gegenseitige Kompatibilität der Betriebsmittel anhand dem Betriebsmittelkompatibilitätsabgleich geprüft, bevor mithilfe des automatisierungsbezogenen Adaptivitäts- und intelligenzbezogenen Kompatibilitätsabgleich die Betriebsmittel zu möglichen Zellkonfigurationen (Abbildung 77) kombiniert wurden. Im Nachfolgenden ist das Vorgehen für die erste Zellkonfigurationsvariante erläutert. Die in diesem Zuge vollzogene kapazitätsbezogene Auslegung ist im vierten Konfigurationsbaustein dargelegt.

Anwendung und Bewertung der Methodik

ZK A.1			ZK A.2			ZK A.3				
ST1	FM	BMK _{1,1}	ST1	ZM	BMK _{1,2}	ST1	FM	BMK _{1,1}		
	ZM	BMK _{4,2}		FM			BMK _{5,2}		ZM	BMK _{6,2}
	TM			TM					TM	
ST2	TM	BMK _{3,1}	ST2	TM	BMK _{4,1}	ST2	TM	BMK _{3,1}		
	ZM			FM			ZM			
	FM	FM		FM						

Legende:

ZK: Zellkonfiguration ST: Station BMK_j: Betriebsmittelkonfiguration j von Betriebsmittel BM i
 TM: Transportmodul ZM: Zuführmodul FM: Fertigungsmodul

Abbildung 77: Auszug alternativer Zellkonfigurationen

Bei der ersten Zellkonfigurationsvariante wurde eine selbststeuernde, automatisierte Fertigungszelle als CPPS-spezifische Anwendung konzipiert, bei der ein verfahrbarer Handlingsroboter den Transport von Bauteilen und deren Handhabung für drei Entpulverungs- und eine Messanlage übernimmt. Im dazugehörigen intelligenzbezogenen Kompatibilitätsabgleich (Abbildung 78) sind die betriebsmittelspezifischen Steuerungseigenschaften abhängig von den steuerungstechnischen Randbedingungen des ersten Konfigurationsbausteins dargelegt. Neben den Automatisierungseigenschaften wurden damit die IuK-Technologien und intelligenten Funktionen für die CPPS-spezifische Anwendung determiniert.

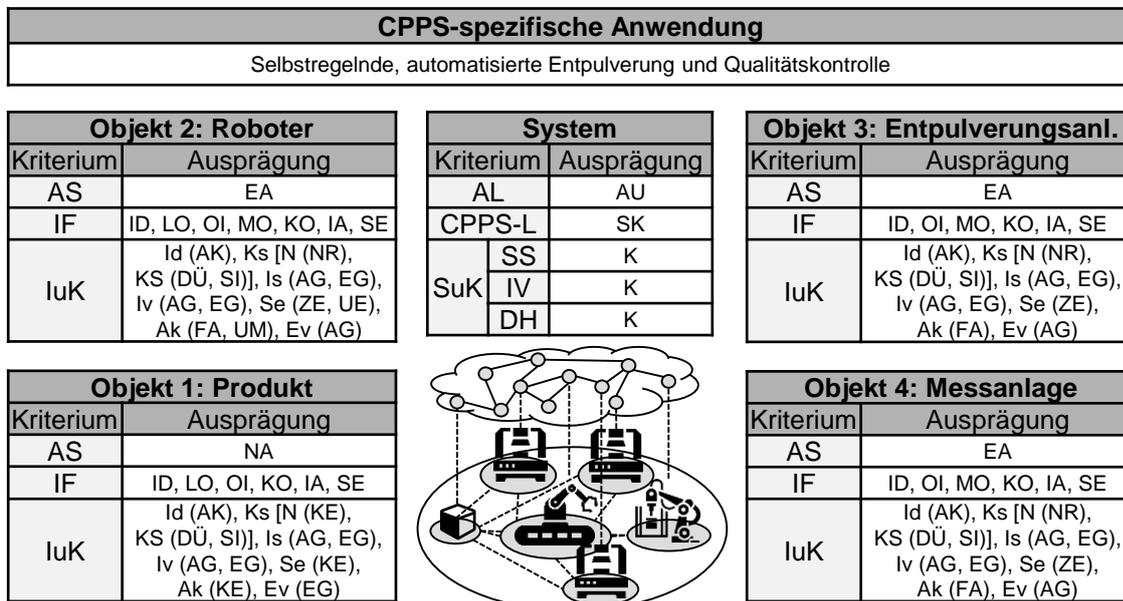


Abbildung 78: CPPS-spezifische Eigenschaften auf System- und Objektebene bei der ersten Zellkonfigurationsvariante

Im Intelligenzbezogenen Kompatibilitätsabgleich sind auf Systemebene die steuerungstechnischen Randbedingungen in Form des Automatisierungs- (Automatisiert) und CPPS-Leistungslevels (Selbstkonfiguration) wie auch die kombinierte Koordination, Informationsverarbeitung und Datenhaltung der Zellsteuerung ausgewiesen. Bei der Koordination erfolgt die zentrale Zuweisung des auftragspezifischen Werkstücks zur Entpulverungsanlage über die Cloud-Plattform mit dem Koordinationsagent (vgl. Abschnitt 2.2.3), ehe die dezentrale Prozesssteuerung durch die direkte Kommunikation der Betriebsmittel- und Produktagenten ausgeführt wird. Analog dazu findet die kombinierte Datenhandhabung und Informationsverarbeitung dezentral in den intelligenten Produkten und Betriebsmitteln wie auch zentral in der CPPS-basierten Zellsteuerung statt.

Im Zuge der Prozessausführung interagieren die erweitert automatisierten Entpulverungsanlagen und Messanlage mit dem Werkstück bzw. dessen Ladungsträger, um entsprechende Programme für die bauteilgerechte Reinigung und Qualitätskontrolle zu laden bzw. auf Basis von Verhaltensmustern zu generieren und auszuführen. Ebenso sammeln die Anlagen Daten und übertragen diese in die CPPS-basierte Zellsteuerung. So wird beispielsweise während deren Be- bzw. Entladung mit dem Handlingsroboter die korrekte Einspannung überwacht, Fehler situativ erkannt oder die Beladungstür automatisch geöffnet bzw. geschlossen. Die Anlagen kommunizieren darüber hinaus mit dem erweitert automatisierten Handlingsroboter zur Regelung des Handhabungsablaufs. Der Roboter gibt dabei die Handhabungsvorgänge vor und meldet den Be- bzw. Endladestatus an die Anlagen. Ebenso führt der verfahrbare Handlingsroboter den Werkstücktransport zu den Anlagen aus und interagiert mit dem Werkstück, um neben dem Transport- bzw. Handhabungsauftrag auch dessen Lokalität und Bauteilinformationen zu erhalten.

Mithilfe der Modellierung des steuerungstechnischen Prozessablaufs anhand eines Sequenzdiagramms (vgl. Abschnitt 5.1.2.2) erfolgte auf Objektebene die Ermittlung der intelligenten Funktionen, wovon wiederum die erforderlichen IuK-Technologien über die Zusammenhangs-Matrix (vgl. Abschnitt 5.1.3.2) abgeleitet wurden. Ein exemplarischer Auszug des Sequenzdiagramms (Abbildung 79) zeigt den direkten Nachrichtenaustausch und das spezifische Verhalten von Produkt- und Anlagenagenten am Beispiel des Rüst- und Transportvorgangs. So ließen sich zum Beispiel anhand der ermittelten intelligenten Funktionen für den Roboter (Transportagent) und unter Berücksichtigung der steuerungstechnischen Randbedingungen dessen notwendige IuK-Technologien determinieren (vgl. Abbildung 78).

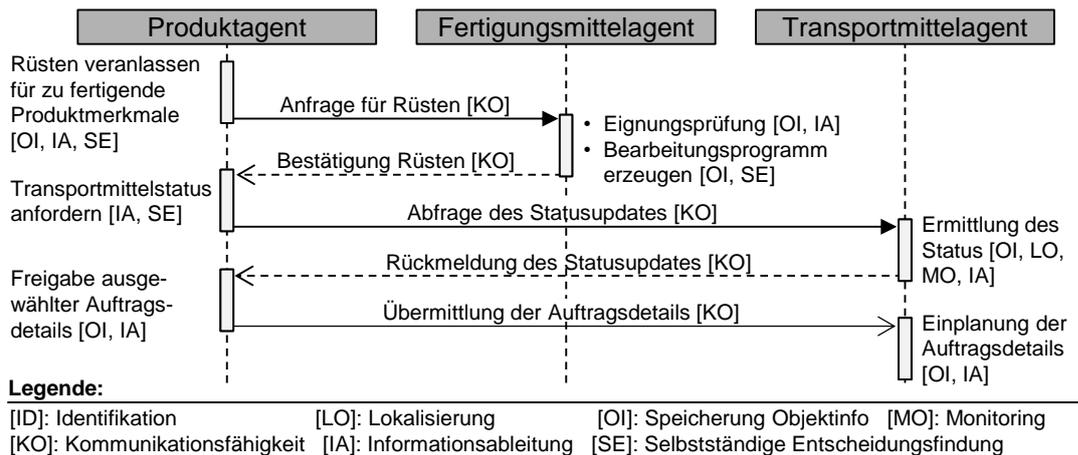


Abbildung 79: Exemplarischer Auszug aus dem Sequenzdiagramm

Konfigurationsbaustein 4: Kapazitätsbezogene Auslegung

Begleitend zur technischen Auslegung der Zellkonfigurationen (vgl. Konfigurationsbaustein 3) fand die kapazitätsbezogene Abstimmung statt, indem die erforderliche Bearbeitungskapazität mit dem verfügbaren Kapazitätsangebot abgeglichen wurde (vgl. Abschnitt 5.2.4). Während sich die verfügbare Kapazität aus der geforderten monatlichen Ausbringungsmenge der zugehörigen Ausbaustufe (vgl. Abschnitt 7.2.2.1), der im Drei-Schicht-Betrieb zur Verfügung stehenden Zeit und des OEE-abhängigen Zeitnutzungsgrades ergab, wurde die erforderliche Kapazität mittels der werkstückspezifischen Prozesszeiten der Betriebsmittel bestimmt. Dementsprechend wurden die individualisierten Bauteile bzw. Bauteilstrukturvarianten anhand deren primärprozessbezogenen Bearbeitungskomplexität in vier Produkttypen (leicht bis sehr aufwändig) eingeteilt, denen jeweils automatisierungsgradabhängige Bearbeitungszeiten der Betriebsmittel zugrunde gelegt wurden.

Zur Erfüllung des Kapazitätsbedarfs erfolgte eine iterative Auslegung der Zellkonfigurationsvarianten mit den vorherigen Konfigurationsbausteinen. Dazu wurden beispielsweise alternative Betriebsmittel verwendet, Anpassungen am Prozessablauf vorgenommen oder die Betriebsmittelanzahl verändert. So wurden zum Beispiel für die erste Zellkonfigurationsvariante drei Entpulverungsanlagen, eine Messanlage und ein verfahrbarer Handlingsroboter zur Deckung des Kapazitätsbedarfs ermittelt. Nach der durchgeführten Grobbewertung (vgl. Abschnitt 6.3.2) geeigneter Zellkonfigurationsvarianten fiel die Entscheidung auf die erste Variante als Basisstufe (vgl. Abbildung 77).

Konfigurationsbaustein 5: Rekonfiguration

Aufbauend auf der Zellkonfiguration der Basisstufe des dritten Ausbaustufenkonzeptes erfolgte die Konzeptionierung der Zellkonfigurationen der ersten und zweiten Ausbaustufe (Abbildung 80) entsprechend der prinzipiellen Veränderungsstrategie, indem Skalierungs- und Rekonfigurationsmechanismen (vgl. Abschnitt 5.2.5) über die vorherigen vier Konfigurationsbausteine implementiert wurden. Dabei wurde zunächst die Zellkonfiguration der zweiten Ausbaustufe von der Zellkonfiguration der dritten Stufe (Basisstufe) abgeleitet und daraus wiederum die Initialkonfiguration der ersten Ausbaustufe entwickelt. Als technische Skalierungsmechanismen dienten sowohl die Arbeitsinhalteverlagerung und Stationsparallelisierung als auch die Anpassung von Intelligenz- und Automatisierungsgrad, während die Veränderung der Mitarbeiteranzahl als organisatorischer Skalierungsmechanismus wirkte.

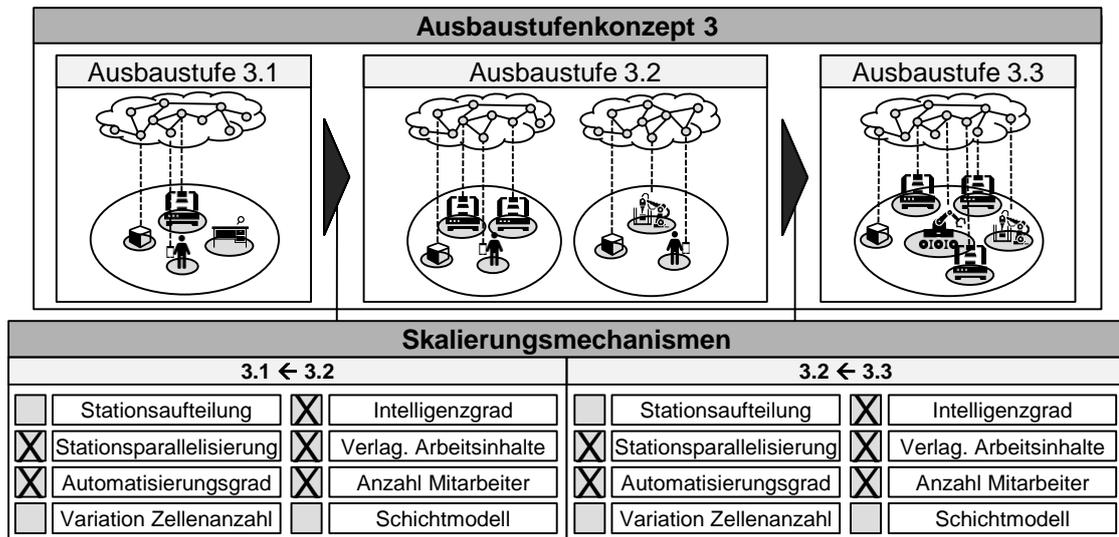


Abbildung 80: Drittes Ausbaustufenkonzeptes mit dessen Zellkonfigurationen

Anstatt des automatisierten, selbststeuernden Prozessablaufes in der dritten Ausbaustufe, erfolgt in der zweiten Ausbaustufe die Anlagenbedienung durch Anlagenführer, die die Anlagenprogrammierung und manuellen Handhabungsvorgänge ausführen. Der Entpulverungs- und Kontrollprozess wurde dazu in zwei Zellen aufgeteilt, die jeweils in das Transportsystem des übergeordneten Fertigungssystems eingebunden sind. Während in der Messzelle ein Anlagenführer die Messanlage bedient, ist in der Entpulverungszelle eine Mehrmaschinenbedienung für zwei Entpulverungsanlagen realisiert. Die Anlagen nutzen CPPS-spezifische Anwendungen zur Prozessoptimierung und -stabilisierung.

Der inkrementelle Ausbau beruht auf der Initialkonfiguration der ersten Ausbaustufe. Die Initialkonfiguration besitzt eine CPPS-fähige Entpulverungsanlage, die von einem Anlagenführer programmiert wird, der außerdem den manuellen Kontrollprozess an einem Arbeitstisch ausführt. Die dabei erfassten Daten werden für CPPS-spezifische Anwendungen (z. B. Anlagenzustandsdiagnose) in der CPPS-basierten Zellsteuerung gesammelt. Damit beinhaltet die Initialkonfiguration das Potenzial zur Wiederverwendung von Anlagen und deren Anpassung hinsichtlich des Automatisierungs- und Intelligenzgrades über die Ausbaustufen hinweg.

Ergebnis inklusive der weiteren Konzeptalternativen

Darüber hinaus wurden gemäß dem dargelegten Vorgehen die Zellkonfigurationen zu den beiden weiteren Konzepten erarbeitet, die nachfolgend erläutert sind. Somit lagen insgesamt drei Ausbaustufenkonzepte (Abbildung 81) mit unterschiedlichen Initialkonfigurationen (Ausbaustufe 1) vor, aus denen sich die Zellkonfigurationen für die beiden weiteren Ausbaustufen entsprechend den prinzipiellen Veränderungsstrategien realisieren ließen.

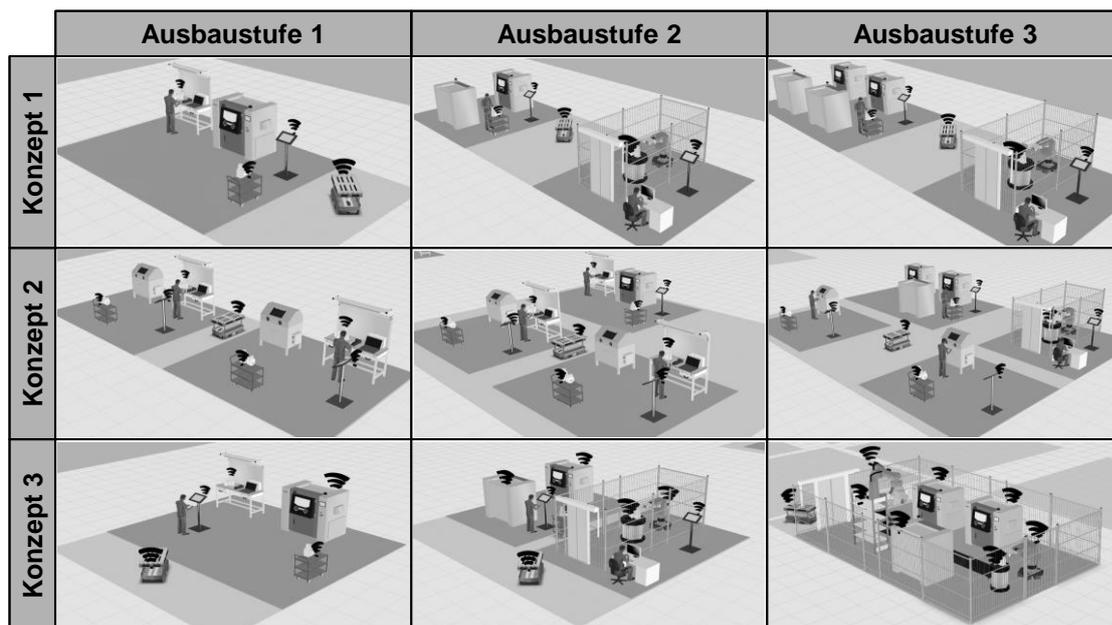


Abbildung 81: Ausbaustufenkonzepte mit deren Fertigungszellkonfigurationen

Die Initialkonfiguration des ersten Ausbaustufenkonzepts besitzt, analog zum dritten Konzept, jedoch ohne CPPS-Anbindung, eine vom Anlagenführer automatisiert programmierte Entpulverungsanlage. Der Werker führt zugleich die manuelle Kontrolle der entpulverten Bauteile aus. In der zweiten Ausbaustufe wird die Initialkonfiguration auf zwei Zellen aufgeteilt, wobei die Entpulverung durch eine Mehrmaschinenbedienung realisiert und die Qualitätskontrolle automatisiert wird.

Anschließend erfolgt in der dritten Ausbaustufe die Ausweitung der Mehrmaschinenbedingung für den Entpulverungsprozess.

Im Gegensatz dazu, werden beim zweiten Ausbaustufenkonzept zwei initiale Zellkonfigurationen mit manuellen Entpulverungs- und Kontrollprozess in der zweiten Ausbaustufe um eine zusätzliche Zellkonfiguration ergänzt, bei der ein Anlagenführer die automatisiert programmierte Entpulverung und manuelle Qualitätskontrolle übernimmt. Die Zellkonfigurationen sind in der darauffolgenden Endausbaustufe hinsichtlich des Kontrollprozesses separiert. Neben den Entpulverungszellen liegt somit eine eigene Messzelle vor, bei der ein Anlagenführer die automatisiert programmierte Messanlage bedient. Zudem ist das Konzept der Mehrmaschinenbedienung in der assistiert automatisierten Entpulverungszelle umgesetzt.

7.2.2.3 Ableitung und Absicherung von Ausbaustufenfolgen

Aufbauend auf den erarbeiteten Ausbaustufenkonzepten wurden mit dem dritten Schritt die szenariospezifische Ableitung von Ausbaustufenfolgen und virtuelle Absicherung der Zellkonfigurationen vollzogen (vgl. Abschnitt 6.3.3). Die Ableitung der **Ausbaustufenfolgen** (Abbildung 82), ausgehend von den Initialkonfigurationen, erfolgte anhand der Kapazitäts- und Funktionalitätsänderungen zu den relevanten Zeitpunkten eines Lebenszyklusszenarios (vgl. Abschnitt 7.2.2.1). Beim ersten Szenario werden demnach die Initialkonfigurationen über einen langen Zeitraum verwendet, ehe in die zweite Ausbaustufe gewechselt wird. Im zweiten Szenario beginnt nach kurzer Anfangsphase der Wechsel von den Konfigurationen der ersten in die zweite Ausbaustufe und nach mittlerer Übergangsphase wiederum ein Wandel in die Konfigurationen der dritten Stufe. Beim dritten Szenario findet ein direkter Wechsel in die Konfigurationen der dritten Stufe statt.

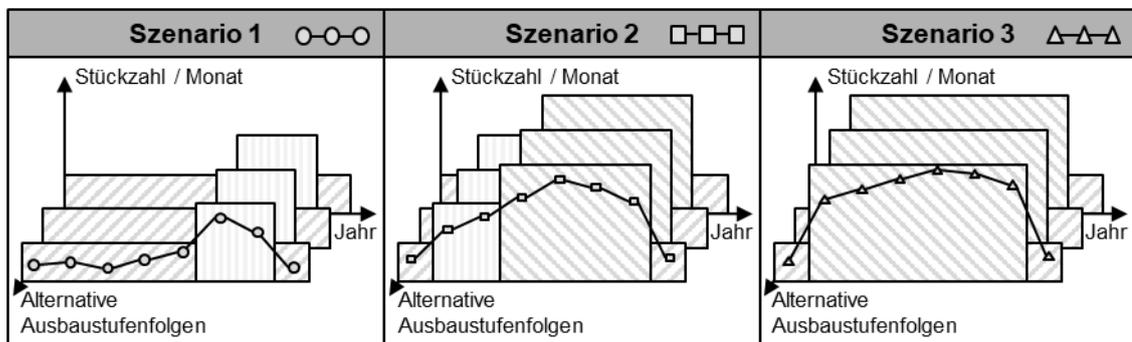


Abbildung 82: Szenariospezifische Ausbaustufenfolgen

Zur **virtuellen Absicherung** der Konzeptalternativen diente die Durchführung von szenariospezifischen Simulationsstudien (vgl. VOIT ET AL. 2020a, VOIT ET AL. 2021). Die dafür erforderliche Implementierung der szenariobezogenen Fertigungsprogramme und der modularen, skalierbaren Fertigungszellkonfigurationen erfolgte in ein agentenbasiertes Simulationsmodell der Software AnyLogic (vgl. VOIT ET AL. 2021). Die Produkte und Betriebsmittel wurden als Agenten angelegt, die konzipierten Zellkonfigurationen über modulare, skalierbare Modellierungsgrundbausteine verwirklicht und die entsprechenden Basisdaten bzw. Eigenschaften zu den Modulen und Agenten in einer Datenbank abgelegt. Zudem sind für die kennzahlenbasierte Bestimmung von Automatisierungsgrad und Leistungsfähigkeit geeignete Bewertungsbausteine im Simulationsmodell umgesetzt.

Ein exemplarischer Aufbau der im Simulationsmodell implementierten Zellkonfiguration der dritten Ausbaustufe des dritten Ausbaustufenkonzeptes sowie ein vereinfachter Auszug zu den kennzahlenbasierten Simulationsergebnissen des zweiten Szenarios für jede Zellkonfiguration der Ausbaustufenkonzepte ist in der nachfolgenden Darstellung (Abbildung 83) ersichtlich. Die Ergebnisse zeigen beispielsweise für die abgebildete Zellkonfiguration, dass diese gegenüber den beiden Konfigurationen derselben Ausbaustufe hinsichtlich der Kennzahlen Durchlaufzeit und Bestand besser bewertet ist. Ebenso weisen die geringeren Werte bei der anlagenspezifischen Effizienz bzw. Gesamteffizienz daraufhin, dass ausreichend Potenzial vorhanden ist, um höhere Ausbringungsmengen, wie beim dritten Szenario (vgl. Abschnitt 7.2.2.1) gefordert, zu bewerkstelligen.

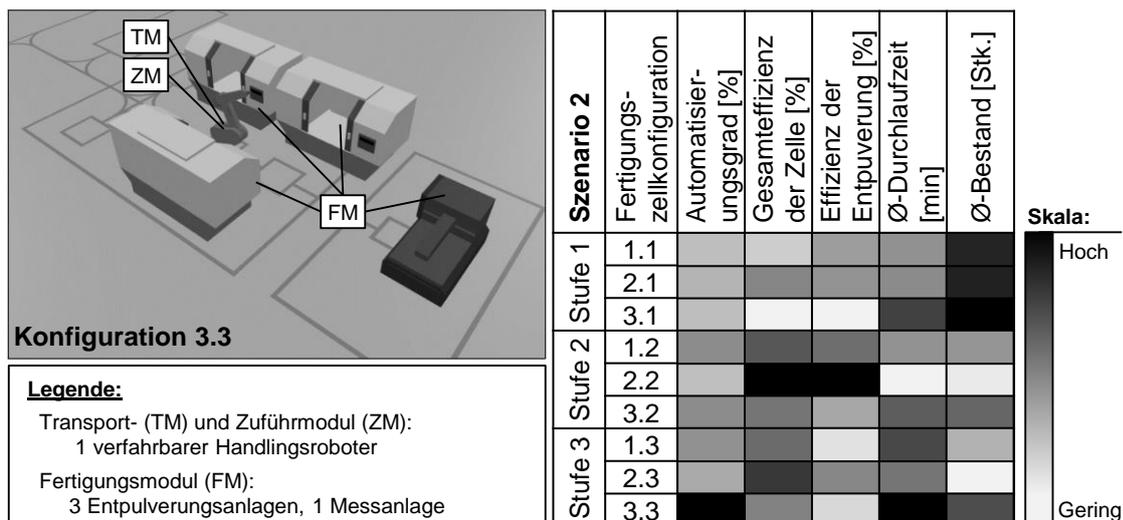


Abbildung 83: Auszug aus der Simulation in Anlehnung an VOIT ET AL. (2021)

7.2.3 Bewertung der Ausbaustufenkonzepte

In der dritten Planungsphase fand die szenariobasierte Bewertung der Ausbaustufenkonzepte zur Auswahl der präferierten Initialkonfiguration (vgl. Abschnitt 6.4) statt. Demnach erfolgte zunächst eine Leistungs- (Abschnitt 7.2.3.1) und Kostenbewertung (Abschnitt 7.2.3.2), bevor deren Einzelergebnisse in eine leistungs- und kostenbezogene Gesamtbewertung (Abschnitt 7.2.3.3) überführt wurden.

7.2.3.1 Leistungsbewertung

Im ersten Schritt fand die Leistungsbewertung (vgl. Abschnitt 6.4.1) der Ausbaustufenkonzepte statt. Mithilfe der erweiterten Nutzwertanalyse (Abbildung 84) wurden hierzu szenarioabhängig die gewichteten Kriterien aus der Zielvorgabe (vgl. Abschnitt 7.2.1.3) hinsichtlich deren Erfüllungsgrads mit einem Punktwert zwischen unbefriedigend (0 Punkte) bis sehr gut (4 Punkte) bewertet und zum Nutzwert für die Ausbaustufenkonzepte aufaddiert. Anschließend erfolgte zur Bestimmung der **leistungsbezogenen Einzelwertigkeit** die Normierung des Nutzwerts zwischen 0 und 1. Insgesamt wurden auf diese Weise neun leistungsbezogene Einzelwertigkeiten (vgl. Abschnitt 7.2.3.3) über alle Szenarien ermittelt. So hat beispielsweise im zweiten Szenario das dritte Konzept die höchste Wertigkeit.

Szenario 2							
Kriterien	GF	ASK 1		ASK 2		ASK 3	
		PW	NW	PW	NW	PW	NW
Bearbeitungsflexibilität	27,5 %	2	0,55	4	1,10	3	0,83
Rekonfigurationsgrad	22,5 %	2	0,45	1	0,23	4	0,90
Prozesstransparenz	15,0 %	1	0,15	2	0,30	4	0,60
Implementierungsaufwand	12,5 %	2	0,25	3	0,38	1	0,13
Kostenflexibilität	12,5 %	3	0,38	3	0,38	2	0,25
Innovationsgrad	7,5 %	1	0,08	1	0,08	4	0,30
Flächenbedarf	2,5 %	3	0,08	1	0,03	4	0,10
Summe	100 %	15	1,93	16	2,48	23	3,10
Leistungsbezogene Einzelwertigkeiten		0,48		0,62		0,78	

Legende:

ASK: Ausbaustufenkonzept GF: Gewichtungsfaktor PW: Punktwert NW: Nutzwert

Abbildung 84: Erweiterte Nutzwertanalyse am Beispiel des zweiten Szenarios

7.2.3.2 Kostenbewertung

Nach der Leistungsbewertung folgte im zweiten Schritt die Kostenbewertung (vgl. Abschnitt 6.4.2) für jedes Ausbaustufenkonzept szenariospezifisch. Die auftretenden Lebenszykluskosten einer Ausbaustufenfolgen wurden dazu mit Hilfe des

Anwendung und Bewertung der Methodik

Kostenberechnungsschemas (Abbildung 85) in direkte und indirekte Kostenarten unterteilt, den einzelnen Lebenszyklusphasen zugeordnet und je Jahr über die Kapitalwertmethode auf einen Kostenbarwert abgezinst. Anhand der Division des ermittelten Kostenbarwerts durch die festgelegten Idealkosten errechnete sich somit die **kostenbezogene Einzelwertigkeit** je Szenario eines Ausbaustufenkonzeptes. Als wesentliche Berechnungsgrundlage dienten elementare Kostenfaktoren, wie Raum-, Personalkosten- oder Zinssatz. Ebenso wurden zum Schutz von Geschäftsgeheimnissen teilweise keine exakten Zahlen, sondern verhältnismäßige und realitätsnahe Kostenangaben von Herstellern und Betreibern verwendet.

ASK 3 - Szenario 2		Lebenszyklusphase								
Kostenarten		EP	NP 1	RP 1	NP 2	RP 2	NP 3	RP 3	NP 4	VP
Direkt	Beschaffungskosten	158.700		252.400		254.800				
	Beschaffungsfolgekosten	11.400	1.050	10.000	1.550	157.200	54.150		32.150	
	Betriebs- und Hilfsstoffe		15.129		38.450		52.290		33.878	
	Nutzungskosten		4.725	3.840	12.165	7.680	19.215	1.920	10.215	
	Personalkosten		81.906		154.176		20.600		5.020	
	Außerbetriebnahme			600				1.200		
	Verwertung			-1.600				-62.915		
Indi.	Fertigungsplanung	18.000	4.500	7.500	6.000	7.500	7.200	7.500	3.000	
	Produktionsmanagement		7.500		10.500		19.200		7.500	
Summe der Kosten pro Jahr		188.100	114.810	272.740	222.841	427.180	172.655	-52.295	91.763	0
Kostenbarwert		1.874.841								
Kostenbez. Einzelwertigkeit		0,80								

Legende:

ASK: Ausbaustufenkonzept EP: Entstehungs- NP: Nutzungs- RP: Rekonfigurations- VP: Verwertungsphase

Abbildung 85: Auszug aus der Kostenberechnung am Beispiel des dritten Ausbaustufenkonzeptes für das zweite Szenario

Insgesamt wurden drei szenariospezifische Kostenbarwerte (Abbildung 86) zu jedem Ausbaustufenkonzept berechnet und daraus neun kostenbezogene Einzelwertigkeiten (vgl. Abschnitt 7.2.3.3) ermittelt. Zudem erfolgte die Berechnung des gewichteten, mittleren Kostenbarwertes je Konzept durch Addition der Kostenbarwerte abhängig von den Eintrittswahrscheinlichkeiten (vgl. Abschnitt 7.2.1.2).

Szenario	P	ASK 1	ASK 2	ASK 3
1	0,2	1.216.044 €	2.822.499 €	1.260.697 €
2	0,6	2.384.053 €	4.267.089 €	1.874.641 €
3	0,2	2.793.255 €	4.993.687 €	1.944.278 €
Gesamt	1	2.232.292 €	4.123.491 €	1.765.780 €

Legende:

ASK: Ausbaustufenkonzept P: Eintrittswahrscheinlichkeit

Abbildung 86: Szenariospezifische Kostenbarwerte der Ausbaustufenkonzepte

7.2.3.3 Gesamtbewertung

Mit dem dritten Schritt erfolgte die finale Gesamtbewertung (vgl. Abschnitt 6.4.3) der Ausbaustufenkonzepte. Dafür wurden zunächst mithilfe eines Scoring-Verfahrens (Abbildung 87) die kosten- bzw. leistungsbezogenen Einzelwertigkeiten der Ausbaustufenkonzepte mit den szenariospezifischen Eintrittswahrscheinlichkeiten (vgl. Abschnitt 7.2.1.2) multipliziert und zu **Gesamtwertigkeiten** addiert.

Szenario		ASK 1		ASK 2		ASK 3	
Nr.	P	LW	KW	LW	KW	LW	KW
1	0,2	0,48	0,82	0,65	0,35	0,63	0,79
2	0,6	0,48	0,63	0,62	0,35	0,78	0,80
3	0,2	0,51	0,64	0,58	0,36	0,78	0,93
Gesamt		0,49	0,67	0,62	0,35	0,75	0,82

Legende:

ASK: Ausbaustufenkonzept P: Eintrittswahrscheinlichkeit LW: Leistungswertigkeit KW: Kostenwertigkeit

Abbildung 87: Scoring-Verfahren zur Ermittlung der Gesamtwertigkeit

Darauf basierend fand der Ergebnisübertrag in ein Kosten-Leistungswertigkeits-Portfolio (Abbildung 88) statt. Anhand der Gegenüberstellung der einzelnen Ausbaustufenkonzepte fiel die **Auswahlentscheidung** schließlich auf das dritte Ausbaustufenkonzept bzw. dessen Initialkonfiguration, das die höchste kosten- und leistungsbezogene Gesamtwertigkeit besitzt.

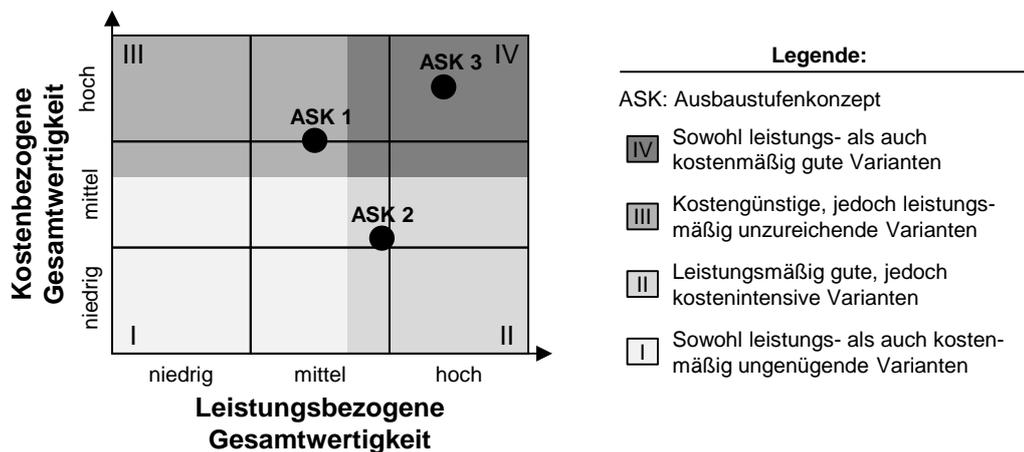


Abbildung 88: Kosten-Leistungswertigkeits-Portfolio

7.2.4 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Abschnitt geht es darum, die spezifischen Ergebnisse der Pilotanwendung zu diskutieren und die Allgemeingültigkeit zu beurteilen. Diesbezüglich wurde die Methodik im Hinblick auf ihre Zweckmäßigkeit, der Übertragbarkeit auf eine industrielle Produktionsumgebung und ihrer Anwendbarkeit in anderen Bereichen untersucht.

Zweckmäßigkeit des Methodikeinsatzes

Der zweckmäßige Einsatz der Planungsmethodik wurde anhand der Pilotanwendung und der damit erzielten Ergebnisse analysiert. Dazu galt es, den Mehrwert der Methodik für den sukzessiven Ausbau von Fertigungssystemen mit CPPS-Strukturen aufzuzeigen. Dementsprechend erfolgte eine Gegenüberstellung des dritten Ausbaustufenkonzeptes (Referenzkonzept) mit den beiden Vergleichskonzepten (Ausbaustufenkonzept 1 und 2), da nur das Referenzkonzept eine CPPS-basierte Anpassung des Automatisierungs- und Intelligenzgrades berücksichtigt.

Für das Referenzkonzept zeigte sich unmittelbar, dass sich durch die Einbeziehung der Informationsautomatisierung neue Gestaltungsmöglichkeiten eröffneten. So konnte bei der Entwicklung alternativer Zellkonfigurationen auf eine Vielzahl von CPPS-spezifischen Anwendungen zurückgegriffen werden, um eine Verlagerung kognitiver Tätigkeiten vom Menschen auf das Steuerungs- und Kommunikationssystem zu ermöglichen. Mit Hilfe der Planungsmethodik kann demnach der Einsatz der Informationsautomatisierung systematisch geplant und gezielt zur Zielerreichung eingesetzt werden. Den daraus gewonnenen Mehrwert belegen auch die erreichten Ergebnisse. Das Referenzkonzept stellt nicht nur das leistungsfähigste, sondern auch das kostengünstigste Ausbaustufenkonzept dar. Die anwendungsfall-spezifische Erprobung bestätigt somit die Eignung des zweckmäßigen Methodikeinsatzes im Kontext der Produktionssystemplanung für modulare, skalierbare Fertigungszellen in CPPS-Strukturen.

Übertragbarkeit der Ergebnisse auf industrielles Umfeld

Des Weiteren wurde hinsichtlich der Replizierbarkeit in einer industriellen Produktionsumgebung die Pilotanwendung der Methodik an einem ausgewählten CPPS-Demonstrator kritisch hinterfragt, der eine Fertigungszelle zur Entpulverung und geometrischen Qualitätsprüfung von additiv gefertigten Bauteilen im Kontext eines digital vernetzten Fertigungssystems repräsentiert. Die Pilotanwendung ergab sich aus dem Industrie 4.0-Forschungsfeld, das unter anderem die technologische Realisierung von CPPS-spezifischen Anwendungen verfolgt.

Der Aufbau der betrachteten Fertigungszelle umfasst, neben serienmäßig eingesetzten Robotern, Entpulverungsanlagen und weiteren Fertigungsmitteln, ein CPPS-basiertes Kommunikations- und Steuerungssystem, das im industriellen Umfeld genutzt wird. Hinsichtlich des Werkstückspektrums wurde zudem eine Auswahl additiv gefertigter Serienbauteile mit komplexen, individualisierten Strukturen betrachtet. Folglich ist die Anwendung der Methodik an der Demonstratorzelle mit realen Produktionssituationen vergleichbar, setzt aber die technologische Funktionsfähigkeit, insbesondere der CPPS-spezifischen Anwendungen, im industriellen Umfeld voraus. Ferner gilt es zu berücksichtigen, dass die erzielten Ergebnisse in der ökonomischen Bewertung wegen Geschäftsgeheimnissen in den absoluten Zahlen von einer industriellen Anwendung abweichen, aber im relativen Vergleich valide sind.

Anwendbarkeit der Methodik in anderen Bereichen

Darüber hinaus wurde hinterfragt, inwieweit die zweckmäßige Anwendung der entwickelten Planungsmethodik für weitere Fertigungsprozesse gegeben ist. Im Umfeld der additiven Fertigung stehen neben den additiven insbesondere die subtraktiven Fertigungsverfahren im Fokus der CPPS-spezifischen Technologieentwicklung zur Erhöhung des Automatisierungsgrades entlang der Prozesskette (vgl. z. B. VDMA 2021, PEREIRA ET AL. 2021, ANDERHOFSTADT & DISSELKAMP 2022). Im Forschungsprojekt „FaPlaMult“ (vgl. Abschnitt 7.1) wurden daher bei der Planung einer Fertigungsfabrik weitere Fertigungsverfahren entlang der LBM-Prozesskette mithilfe der entwickelten Planungsmethodik konzeptioniert. Neben dem Entpulverungsprozess wurde unter anderem das Entfernen von Stützstrukturen durch Fräsen oder Trennen der Bauplattform mittels Drahterodieren betrachtet (vgl. VOIT ET AL. 2020c).

Jenseits der additiven und subtraktiven Fertigung wird sich auch in anderen Branchen mit entkoppelten Fertigungszellen in CPPS-Strukturen (vgl. Abschnitt 2.2.2) für die Serienfertigung individualisierter Produkte beschäftigt. Einen Überblick über relevante Branchen liefert beispielsweise der Fachbericht von HELLMICH ET AL. (2022), der zugleich die unterschiedlichen Reifegrade einzelner Produktionsbereiche im Hinblick auf ein CPPS-basiertes Fertigungssystem aufzeigt. Ein bedeutendes Einsatz- und zugleich Forschungsgebiet stellen die Produktionsbereiche der Automobilproduktion dar (vgl. z. B. CÜPPERS 2018, GÖPPERT ET AL. 2021, HELLMICH ET AL. 2022). In Fachkreisen wurden daher Diskussionen mit Experten über die Anwendung der Planungsmethodik am Beispiel des Automobilbaus geführt (vgl. VOIT ET AL. 2020b, 2023).

Als ein praktikables Anwendungsfeld hat sich die Karosseriefertigung für PKW oder LKW-Fahrerkabinen herauskristallisiert. Verschiedene Fahrzeughersteller verfolgen hierbei die Weiterentwicklung des Rohbaus hin zu einem entkoppelten Fertigungssystem mit CPPS-Strukturen, das aus skalierbaren Fertigungsmodulen in Form intelligenter Schweißroboter besteht und das auftragspezifische Fügen individualisierter Karosserieteile ermöglicht (vgl. z. B. CÜPPERS 2018, HELLMICH ET AL. 2022). Zentrales Ziel stellt dabei das Erreichen einer Unabhängigkeit von produktspezifischen Anforderungen im Rohbau dar, um die Anlagen zukünftig für mehrere Modellzyklen und eine steigende Variantenvielfalt, insbesondere durch die Elektromobilität, nutzen zu können (CÜPPERS 2018). Für das beschriebene Zielbild sind damit die notwendigen technischen und organisatorischen Randbedingungen (vgl. Abschnitt 6.2.1) für einen sinnvollen Einsatz der Planungsmethodik gegeben. Diese kann dabei durch ihren systematischen, modellbasierten Ansatz einen wesentlichen Beitrag zur CPPS-orientierten Gestaltung alternativer Zellkonfigurationen leisten.

Zusammenfassend kann im Rahmen der Pilotanwendung geschlussfolgert werden, dass die Zweckmäßigkeit des Methodikeinsatzes und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf eine industrielle Produktionsumgebung gegeben sind. Ebenso wurde die Anwendbarkeit der Methodik auf andere Fertigungsprozesse und Branchen im Sinne der Allgemeingültigkeit dargelegt.

7.3 Bewertung der Methodik

Basierend auf der exemplarischen Anwendung der entwickelten Methodik ist eine abschließende Bewertung erforderlich. Hierzu wird im Folgenden zunächst die anforderungsbezogene Beurteilung (Abschnitt 7.3.1) dargelegt, ehe auf die wirtschaftliche Bewertung (Abschnitt 7.3.2) und kritische Reflexion (Abschnitt 7.3.3) eingegangen wird.

7.3.1 Anforderungsbezogene Bewertung

Die anforderungsbezogene Bewertung der Methodik erfolgt hinsichtlich der festgelegten Anforderungen (vgl. Abschnitt 4.1). Entsprechend sind nachfolgend die allgemeinen, inhalts- und anwendungsspezifischen Anforderungen berücksichtigt.

Allgemeine Anforderungen

Bei den allgemeinen Anforderungen wurde im Hinblick auf die Konzeption des Planungsvorgehens zwischen Planungsziel, -objekt und -information unterschieden. Um das *Planungsziel* der Methodik, die lebenszyklusorientierte Grobplanung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen, zu erfüllen, wurde für die systematische Erkenntnisgewinnung ein methodisches Planungsvorgehen entwickelt, dem ein modellgetriebener Deskriptions- und Konfigurationsansatz zugrunde liegt. Die Datenmodelle dienen dabei zur systematischen Beschreibung der produkt- und systemrelevanten *Planungsinformationen* sowie der *Planungsobjekte* in Gestalt der Fertigungszellen mit deren Eigenschaften und Strukturen, die mittels der Konfigurationsmodellierung re- bzw. konfigurierbar sind.

Inhaltsspezifische Anforderungen

Basis der Methodikentwicklung stellten fünf inhaltsspezifische Anforderungen dar, wobei sich die ersten beiden auf den modellgestützten Ansatz und die drei weiteren auf das methodische Planungsvorgehen beziehen. Für die Anforderung *modellbasierte Deskription modularer Fertigungszellkonfigurationen* in CPPS-Strukturen einschließlich deren Systemelementen wurde das PPR-Datenmodell definiert. Es ermöglicht die generische Deskription von Produkten, Prozessen und Ressourcen sowie deren Verknüpfung anhand etablierter Normen, Richtlinien, gängiger Modellierungsansätze oder Klassifikationen. Neben technologischer und steuerungstechnischer Eigenschaftscharakterisierung ist die hierarchische und elementare Strukturierung modularer Zellkonfigurationen und Betriebsmittel (Resource), von Wertschöpfungsketten und Prozessabfolgen (Prozess) wie auch eines Werkstückspektrums mit individualisierten Bauteilen (Produkt) durchführbar.

Aufbauend auf dem PPR-Datenmodell wurde für die Anforderung *modellbasierte Generierung alternativer Zellkonfigurationen* (Planungsobjekt) ein Konfigurationsmodellierungsansatz entwickelt. Der Ansatz dient dem Planer, unter Einbezug von dessen Erfahrungswissen, bei der strukturierten und zielorientierten Alternativengenerierung, um so die Planungskomplexität wegen einer Vielzahl an planungsrelevanten Variablen zu beherrschen. Die Modellierung basiert auf fünf voneinander abhängige Konfigurationsbausteine, die Strukturierungs-, Abgleichsverfahren, Mechanismen etc. zur technischen und kapazitätsbezogenen Auslegung und Rekonfiguration modularer Zellkonfigurationen beinhalten. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Erweiterung existierender Ansätze um CPPS-Spezifika.

Eine wesentliche Grundlage bei der Planung stellt die *umfassende Betrachtung planungsrelevanter Rahmenbedingungen* dar. Entsprechend wurden Ansätze zur Bestimmung grundlegender Randbedingungen, konkreter Planungsanforderungen und -ziele erarbeitet. Eine systematische Analyse ermöglicht die Erfassung der Randbedingungen und die Überprüfung, ob eine Skalierungsrelevanz sowie CPPS-spezifische Voraussetzungen für das Planungsvorhaben gegeben sind. Zur Präzisierung konkreter Planungsanforderungen dient eine vorausschauende, szenariobasierte Lebenszyklusbetrachtung, mit der sich Veränderungstreiber anhand von sechs Veränderungsdimensionen determinieren lassen. Ferner unterstützt ein mehrdimensionales Zielsystem bei der Definition relevanter Zielgrößen.

Für die Anforderung *lebenszyklusorientierte Entwicklung alternativer Ausbaustufenkonzepte* steht dem Planer ein strukturiertes Vorgehen zur Verfügung. Um dabei eine überschaubare, aber dennoch differenzierte Vielfalt an Konzeptalternativen zu erhalten, sind zunächst prinzipielle Veränderungsstrategien für definierte Ausbaustufen zu bestimmen. Entsprechend einer prinzipiellen Veränderungsstrategie lassen sich anschließend unter Anwendung der Konfigurationsmodellierung geeignete Ausbaustufenkonzepte erarbeiten. So entstehen ausbaustufenbezogene Zellkonfigurationen mit implementierten Skalierungs- und Rekonfigurationsmechanismen, wodurch unter anderem die sukzessive Anpassung des CPPS-basierten Automatisierungsgrads ermöglicht wird. Infolge der unsicheren Entwicklung der lebenszyklusorientierten Planungsanforderungen ist es darüber hinaus möglich, zu den erarbeiteten Ausbaustufenkonzepten alternative Ausbaustufenfolgen für ausgewählte Szenarien abzuleiten und diese virtuell abzusichern.

Weiterhin wurde angesichts der unsicheren Anforderungsentwicklung ein Ansatz für die *ganzheitliche, lebenszyklusorientierte Bewertung von Ausbaustufenkonzepten* bzw. deren szenariospezifischen Ausbaustufenfolgen in CPPS-Strukturen konkretisiert. Bei diesem Bewertungsansatz wird szenariospezifisch zu jedem Ausbaustufenkonzept eine kosten- und leistungsbezogene Bewertung vorgenommen und ein daraus resultierender Gesamtwert je Konzept ermittelt. Auf Basis der Gesamtwerte kann somit eine differenzierte Entscheidung für die Auswahl der präferierten Initialkonfiguration eines Ausbaustufenkonzeptes getroffen werden.

Anwendungsspezifische Anforderungen

Zusätzlich zu den allgemeinen und inhaltspezifischen Anforderungen galt es hinsichtlich der praktischen Methodikanwendung vier anwendungsspezifische Anforderungen zu berücksichtigen. Die Anforderung der *Übertragbarkeit* ist bei der Me-

thodik dadurch erfüllt, dass diese in verschiedenen branchen- und unternehmensunabhängigen Anwendungsfällen nutzbar ist. Bei der Entwicklung der Methodik wurde dazu auf Allgemeingültigkeit geachtet. Eine zentrale Grundlage bildet dafür die generische Deskription von Produkten, Prozessen und Ressourcen.

Die *Transparenz* der Methodik ist für den Anwender durch den strukturierten und nachvollziehbaren Ablauf mit den zu jedem Schritt zu erwartenden Planungsergebnissen gegeben. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass in den einzelnen, aufeinander aufbauenden Methodenschritten zugehörige Planungshilfsmittel, wie Modelle und Schemata, den Planer bei der Ergebniserzielung unterstützen.

Die Nutzbarkeit individueller Softwarewerkzeuge, Modelle und Methoden in die Methodik belegt dessen *Integrationsfähigkeit*. So sind alternative Softwarewerkzeuge für zum Beispiel Tabellenkalkulationen oder Simulationszwecke verwendbar. Ebenso lassen sich etablierte und weit verbreitete Methoden, wie Lebenszykluskostenrechnung oder Nutzwertanalyse, sowie Modelle, wie Feature-basierte Produkt- oder fähigkeitsbasierte Ressourcenmodelle, nutzen.

Die *Erweiterbarkeit* ergibt sich daraus, dass die Methodik als genereller Leitfaden zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen dient und um individuelle Aspekte ergänzt werden kann. So lässt sich zum Beispiel ein spezifisches Bewertungskriterium hinzufügen oder die simulationsgestützte Absicherung von Zellkonfiguration durch eine prototypische Umsetzung verfestigen.

Dank der Erfüllung der dargestellten Anforderungen konnte das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit, die Entwicklung einer Methodik zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen, einschließlich deren drei Teilzielen (vgl. Abschnitt 1.3), aus Anforderungssicht erreicht werden. Im Nachfolgenden ist die Methodik zusätzlich hinsichtlich der Erfüllung des wirtschaftlichen Nutzens bewertet.

7.3.2 Wirtschaftliche Bewertung

Die wirtschaftliche Bewertung der Methodik basiert auf der Analyse von Aufwand und Nutzen. Zu diesem Zweck wurde für die Methodik zunächst der Aufwand bezüglich Implementierung, initialer Datenaufbereitung und regelmäßiger Anwendung ermittelt, bevor die ökonomische Nutzenbestimmung erfolgte.

Der einmalige **Implementierungsaufwand** umfasst den Aufbau softwaregestützter Planungswerkzeuge als Grundlage für die Durchführung der Methodik und bemisst sich am Personal- und Sachmitteleinsatz. So ermöglicht die Implementierung des PPR-Datenmodells in ein relationales Datenbanksystem einer PLM-Software (z. B. Siemens Teamcenter[®]), welches Bestandteil der Digitalen Unternehmensplattform (z. B. Siemens Digital Enterprise Suite[®]) und mit dem CPPS-basierte Steuerungs- und Kommunikationssystem (z. B. Siemens Mindsphere[®]) verbunden ist (vgl. Abschnitt 7.1.2), die Speicherung, Verwaltung und Verknüpfung von Produkt- und Ressourcendaten einschließlich deren CAD- und CAM-Modellen. Im Falle der virtuellen Absicherung konzipierter Zellkonfigurationen bietet sich die Verwendung handelsüblicher Simulationssoftware (z. B. AnyLogic[®]) an, mit denen die agentenbasierte Modellierung und Simulationsausführung von Produktionssystemen umsetzbar ist. Ferner kann bei der softwaregestützten Umsetzung von Planungshilfsmitteln, wie z. B. Kostenberechnungsschema, Zielpräferenzmatrix oder Abgleichsverfahren, auf weitverbreitete Tabellenkalkulationsprogramme (z. B. Microsoft Excel[®]) oder spezifische Programme (z. B. LifeCyclexpert[®] für Lebenszykluskostenrechnung) zurückgegriffen werden. Ebenso sind für Layoutgestaltung und Modellierung von z. B. Zellkonfigurationen oder Prozessfolgen gängige Visualisierungs- (z. B. PowerPoint[®], Visio[®]) und digitale Planungsprogramme (z. B. visTABLE[®]) verwendbar.

Im Rahmen der Bewertung wurde angenommen, dass die genannten bzw. ähnliche Softwareprodukte vorliegen und demnach anteilige Sachkosten nötig sind. Ebenso ist der Personalaufwand für die Initialisierung der digitalen Planungswerkzeuge nicht unerheblich und hängt stark von den vorhandenen Softwareprodukten sowie anderweitigen Faktoren, wie dem gewünschten Detaillierungsgrad, ab. Es sind beispielsweise die Charakteristika für die PPR-Modelle vorzusehen oder modulare, skalierbare Modellierungsbausteine und Bewertungskenngrößen in das agentenbasierte Simulationsmodell zu implementieren. Insgesamt ergeben sich aus den Sachkosten von 22.000 € und Personalkosten von 34.000 € einmalige Implementierungskosten (Abbildung 89) in Höhe von 56.000 €. Sobald die Softwarewerkzeuge initialisiert sind, dienen diese bei der Methodikausführung.

Einmalige Implementierungskosten				
Position		Anzahl	Kosten / Anzahl	Gesamtkosten
S1	Softwarelizenzen (anteilig)	1 Stk.	20.000 €	20.000 €
S2	IT-Hardware (Monitor, Laptop usw.)	1 Stk.	2.000 €	2.000 €
Summe der Sachkosten				22.000 €
P1	Installation IT (Hard- und Software)	2 PT	1.000 €	2.000 €
P2	Initialisierung PPR-Datenmodell (PLM)	10 PT	1.000 €	10.000 €
P3	Initialisierung Tabellenkalkulation (Excel)	10 PT	1.000 €	10.000 €
P4	Initialisierung Simulationsmodell (AnyLogic)	5 PT	1.000 €	5.000 €
P5	Initialisierung Layoutsoftware (visTable)	2 PT	1.000 €	2.000 €
P6	Schulung Produktionssystemplaner	5 PT	1.000 €	5.000 €
Summe der Personalkosten				34.000 €
Gesamtsumme der Implementierungskosten				56.000 €

Legende:

Stk.: Stück PT: Personentage

Abbildung 89: Ermittlung der Implementierungskosten (Expertenschätzung)

Bei der Methodikanwendung wurde für die Aufwand-Nutzen-Gegenüberstellung zwischen initialen und regelmäßigen Aufwänden differenziert. Der **initiale Aufwand** bezieht sich auf die Aufbereitung relevanter Planungsinformationen und hängt im Wesentlichen von Komplexität und Umfang des betrachteten Planungsvorhabens ab. Im konkreten Anwendungsbeispiel ist dieser Aufwand nicht unbedeutend. Es sind beispielsweise produkt- und ressourcenspezifische Datenmodelle systematisch aufzubereiten, Kostensätze und Einzelkosten für die Kostenrechnung zu erheben oder die Grunddaten des Simulationsmodells zu präparieren. Die initial aufbereiteten Planungsdaten und softwaregestützten Planungswerkzeuge dienen somit als Grundlage für die regelmäßige Methodikanwendung.

Neben den initialen Aufwänden wurden daher die **regelmäßigen Aufwände** zur Durchführung der Methodik (Abbildung 90) entsprechend der Analyse-, Gestaltungs- und Bewertungsphase erfasst und in Personentagen (PT) angegeben. Einen erheblichen Aufwand besitzt im Rahmen der exemplarischen Anwendung (vgl. Abschnitt 7.2) insbesondere die Gestaltung der Ausbaustufenkonzepte durch den zeitintensiven Aufwand für die Konfigurations- und Simulationsmodellierung. Für die Berechnung der monetären Aufwände ist ein Personentag mit einem Tagessatz von 1.000 € für einen Planungsingenieur veranschlagt. Somit bemisst sich der monetäre Aufwand im vorliegenden Anwendungsfall auf 23.000 € zusätzlich zu den Implementierungskosten.

Anwendung und Bewertung der Methodik

Aufwand bei der Methodikanwendung				
Position		Anzahl	Kosten / Anzahl	Gesamtkosten
I1	Erstellung und Pflege der PPR-Datenmodelle	5 PT	1.000 €	5.000 €
I2	Aufbereitung fundamentaler Planungsdaten	2 PT	1.000 €	2.000 €
I3	Präparation der Planungswerkzeuge	3 PT	1.000 €	3.000 €
Summe der initialen Aufwände				10.000 €
R1	Analyse der Rahmenbedingungen	2 PT	1.000 €	2.000 €
R2	Gestaltung der Konzeptalternativen	8 PT	1.000 €	8.000 €
R3	Bewertung der Konzeptalternativen	3 PT	1.000 €	3.000 €
Summe der regelmäßigen Aufwände				13.000 €
Gesamtsumme der Aufwände				23.000 €

Legende:

PT: Personentage

Abbildung 90: Aufwand zur Anwendung der Methodik beim Anwendungsfall

Den Aufwänden steht der **Nutzen** der Methodik gegenüber, der im Wesentlichen darin liegt, dass bereits in Initialkonfigurationen Potenziale für deren sukzessiven Ausbau in CPPS-Strukturen berücksichtigt sind und damit Risiken unnötiger Kosten entlang des Lebenszyklus reduziert werden. Aufgrund unterschiedlicher Planungsfälle lässt sich jedoch keine allgemeingültige Aussage zum ökonomischen Nutzen treffen. Beim Anwendungsbeispiel ergibt sich ein Mehrwert durch die Auswahl eines geeigneten Ausbaustufenkonzeptes gegenüber dessen Alternativen. Der Unterschied zwischen dem präferierten dritten und dem zweiten bzw. ersten Ausbaustufenkonzept beträgt 2.357.711 € bzw. 466.512 € (vgl. Abschnitt 7.2.3.2). Daraus leitet sich ein Kosten-Nutzen-Verhältnis von ca. 1 : 29 bzw. 1 : 6 für den Anwendungsfall ab.

Dieses Verhältnis steigt bei regelmäßiger Methodikanwendung, da Ergebnisse aus den initialen Aufwänden für weitere Planungsvorhaben bereitstehen. Entsprechend fällt der Aufwand bei erneuter Methodikausführung deutlich geringer aus, so dass sich beim exemplarischen Anwendungsfall die initialen Aufwände erheblich einsparen lassen. Darüber hinaus ist der einmalige Implementierungsaufwand bei mehrmaliger Anwendung der Methodik gerechtfertigt und die Wiederverwendung von Betriebsmitteln im Zuge der Rekonfiguration einer Fertigungszelle in der Regel kostengünstiger als eine Neuinvestition.

Durch die dargelegten Ausführungen konnte der wirtschaftliche Nutzen der Methodik für Produktionssystemplaner bestätigt werden. Folglich ist neben der anforderungsbezogenen (vgl. Abschnitt 7.3.1) auch die wirtschaftliche Erfüllung der entwickelten Methodik gegeben. Im folgenden Abschnitt findet darüber hinaus eine kritische Reflexion der Methodik statt.

7.3.3 Kritische Reflexion

Die kritische Reflexion der entwickelten Methodik erfolgte auf Grundlage des Anwendungsbeispiels (vgl. Abschnitt 7.2). Diesbezüglich fand eine Abschätzung der notwendigen Einschränkungen in einzelnen Planungsschritten statt. Die aufgetretenen Einschränkungen wurden dazu systematisch auf mögliche Auswirkungen analysiert. Konkret kristallisierten sich drei Schwerpunkte heraus.

Ein zentraler Punkt war die zeit- und arbeitsintensive PPR-basierte Modellierung von Zellkonfigurationen (vgl. Abschnitt 7.2.2). Um dabei den Aufwand sowohl für die Charakterisierung von Produkt- und Betriebsmittelsteckbriefen als auch für die Kombinationsvielfalt von Betriebsmitteln zu alternativen Zellkonfigurationen überschaubar zu halten, wurde sich auf eine konzentrierte Auswahl von Betriebsmitteln beschränkt. Ein weiterer Schwerpunkt bei der Konfigurationsmodellierung (vgl. Abschnitt 7.2.2) ergab sich aus dem geringen Erfahrungswissen bei der Ausgestaltung einzelner CPPS-spezifischer Anwendungen. In diesem Zusammenhang erwies sich die Bestimmung der Kriterienausprägungen auf System- und Objektebene mithilfe des intelligenzbezogenen Kompatibilitätsabgleich als herausfordernd, da infolge eines fehlenden Referenzkatalogs mit realisierten CPPS-spezifischen Anwendungen ein gewisses Fachwissen vonnöten war. Als dritter Schwerpunkt stellte sich heraus, dass die Quantifizierung der Auswirkungen von CPPS-spezifischen Anwendungen auf kosten- und leistungsbezogene Kriterien für eine fundierte Investitionsentscheidung (vgl. Abschnitt 7.2.3) zeitaufwendig ist. Es mangelte an belastbaren Erfahrungswerten, weshalb Expertise aus unterschiedlichen Fachdisziplinen zur Abschätzung von Implementierungsaufwand und Nutzen nötig war.

Trotz der Einschränkungen in den einzelnen Planungsschritten wurde eine Methodik entwickelt, die eine strukturierte und zielgerichtete Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen ermöglicht. Insbesondere die Berücksichtigung von Aspekten der Informationsautomatisierung bei der PPR-modellgestützten Charakterisierung und Erarbeitung von Zellkonfigurationen eröffnet neue Gestaltungsmöglichkeiten zur Erreichung planungsrelevanter Zielgrößen. Die systematische Vorgehensweise stellt zudem sicher, dass keine relevanten Faktoren vernachlässigt werden sowie Kosten- und Leistungsaspekte einbezogen sind.

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass die in den Planungsschritten aufgetretenen Einschränkungen vor allem auf fehlendes Erfahrungswissen und einem geringen Grad an Modellierungseffizienz zurückzuführen sind.

Dies ist zwar mit einem erhöhten Aufwand und dem Hinzuziehen von Expertenwissen verbunden, steht aber der zielgerichteten Planung von modularen, skalierbaren Fertigungszellen in CPPS-Strukturen nicht entgegen.

7.4 Fazit

In diesem Kapitel erfolgte die exemplarische Anwendung der entwickelten Methodik zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen, um deren Evaluierung anhand eines Anwendungsfalls durchzuführen. Dabei wurde die Eignung der entwickelten Methodik durch die Planung alternativer Ausbaustufenkonzepte für szenariospezifische Entwicklungen des Fertigungsprogramms dargelegt. Der Produktionssystemplaner ist dadurch in der Lage, den lebenszyklusorientierten, sukzessiven Ausbau modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen bereits in der Initialplanung gezielt vorzunehmen. Ebenso wurde neben dem anforderungsgerechten und wirtschaftlich sinnvollen Gebrauch der Methodik auch deren Einschränkungen nachgewiesen.

8 Schlussbetrachtung

8.1 Zusammenfassung

Trends, wie zunehmende Individualisierung und kürzere Produktlebenszyklen, erfordern eine hochflexible und wandlungsfähige Produktion. Im Kontext von Industrie 4.0 werden deshalb CPPS realisiert. Insgesamt wird durch die damit einhergehende weitreichende Vernetzung und virtuelle Abbildung physischer Produktionsobjekte der zukünftig erreichbare Grad an Automatisierung zunehmen. Vernetzte und digitalisierte Fertigungssysteme werden dabei vor allem einem sukzessiven Ausbau einzelner Fertigungsbereiche entsprechend ihrer lebenszyklusbezogenen Anforderungen unterliegen. Die Ausschöpfung von CPPS-spezifischen Potenzialen erfordert daher ein geeignetes Vorgehen bei der Planung von Produktionssystem, mit der die frühzeitige Planung des Aufbaus und sukzessiven Ausbaus modularer **Fertigungszellen in CPPS-Strukturen** ermöglicht wird.

Vor diesem Hintergrund erfolgte, aufbauend auf einer Zusammenfassung der zu betrachtenden Grundlagen, eine Untersuchung des relevanten Standes der Wissenschaft. Dabei wurden schwerpunktmäßig Ansätze sowohl zur Planung veränderungsfähiger und CPPS-spezifischer Produktionssysteme als auch zur fähigkeitsbasierten Modellierung von Produktionssystemen analysiert. Die Betrachtung bestehender Ansätze zeigte, dass Einzellösungen vorhanden sind, jedoch kein ganzheitliches Planungsvorgehen existiert. Der **Forschungsbedarf** bestand somit in der Entwicklung einer neuartigen Methodik zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen.

Basierend auf dieser Zielsetzung erfolgte die anforderungsbezogene Konzeption der zu entwickelnden Methodik. Die Methodik ist entsprechend in die Grobplanungsphase des generellen Produktionssystemplanungsprozesses eingeordnet und bezieht daraus Input-Informationen als Grundlage für die Planung von modularen, skalierbaren Fertigungszellen im CPPS-Kontext. Die **Planungsmethodik** besteht aus drei Lösungsbausteinen, bei dem ein modellbasierter Deskriptions- und Konfigurationssansatz einem methodischen Planungsvorgehen in der systematischen Erkenntnisgewinnung dienen.

Das **Datenmodell** ermöglicht die Deskription rekonfigurierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen einschließlich derer Systemelemente. Es wurde dazu anhand des fähigkeitsbasierten PPR-Konzepts in die drei Partialmodelle Produkt, Prozess

und Ressource strukturiert und um CPPS-spezifische Eigenschaften, wie physische und informationstechnische Automatisierungs- und Modularisierungsaspekte, erweitert. Im Mittelpunkt der Partialmodellverknüpfung steht das Prozessmodell, dem eine standardisierte Beschreibung der technologischen und steuerungstechnischen Prozesse sowie Prozessfolgemodellierung zugrunde liegt. Die zur Prozessausführung notwendigen Ressourcen beinhaltet das Ressourcenmodell, das die Charakterisierung von Betriebsmitteln und Fertigungszellen sowohl hinsichtlich modularer Aufbaustruktur als auch technologischer und steuerungstechnischer Eigenschaften ermöglicht. Das Produktmodell dient dagegen zur Modellierung von Werkstückspektren mit individualisierten Bauteilen anhand Feature-basierter Bauteilspezifizierung und hierarchischer Bauteilfamilienstrukturierung.

Aufbauend auf dem PPR-Datenmodell wurde ein Ansatz zur **Konfigurationsmodellierung** entwickelt. Der Ansatz besteht aus fünf Konfigurationsbausteinen und ermöglicht die technische und kapazitätsbezogene Gestaltung und Rekonfiguration modularer Fertigungszellen im CPPS-Kontext. Für die technische Auslegung liegen die drei Konfigurationsbausteine Zellstrukturierung, Betriebsmitteleignung und Zellkonfigurationskomposition vor. So kann mit der Strukturierung eine Fokussierung des Lösungsraums hinsichtlich modularer Struktur, CPPS-spezifischer Steuerungseigenschaften und Prozessfolgen vorgenommen werden. Die entsprechende Auswahl möglicher Betriebsmittel für Zellkonfigurationen unterliegt hierbei einem fähigkeits-, funktions- und merkmalsbasierten Betriebsmittelabgleich. Basierend auf der Grundstruktur und der Betriebsmittelauswahl erfolgt mit der Zellkomposition die Generierung alternativer Zellkonfigurationen unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Betriebsmittelkompatibilität, automatisierungsbezogenen Adaptivität und intelligenzbezogenen Kompatibilität. Um dabei deren kapazitätsgerechte Auslegung zu ermöglichen, findet mit dem vierten Konfigurationsbaustein ein Abgleich der erforderlichen Kapazität mit der verfügbaren statt. Darüber hinaus sind zur Umgestaltung von Zellkonfigurationen diverse Skalierungs- und Rekonfigurationsmechanismen im fünften Konfigurationsbaustein definiert, die über die vier anderen Konfigurationsbausteine zu implementieren sind.

Das **methodische Planungsvorgehen** für Ausbaustufenkonzepte besteht aus der Analyse-, Gestaltungs- und Bewertungsphase. Die erste Phase widmet sich der Analyse von Rahmenbedingungen, mit der die Betrachtung grundlegender Randbedingungen, die Präzisierung lebenszyklusorientierter Planungsanforderungen und die Definition relevanter Planungsziele erfolgt. Darauf aufbauend ist mit der Gestaltungsphase die strukturierte Erarbeitung alternativer Ausbaustufenkonzepte

umgesetzt. Aufgrund der Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten besteht die Möglichkeit prinzipielle Veränderungsstrategien für den stufenweisen Ausbau zu definieren, wobei die Anpassungen des CPPS-basierten Automatisierungsgrades als eine von mehreren Optionen dient. Für die entsprechende Gestaltung stufenbezogener Zellkonfigurationen alternativer Ausbaustufenkonzepte wird auf die PPR-Modellbasierte Konfigurationsmodellierung zurückgegriffen, ehe aus den erarbeiteten Konzepten szenariospezifische Ausbaustufenfolgen abgeleitet und virtuell abgesichert werden. Abschließend befähigt die Bewertungsphase einen Anwender zur Auswahl einer präferierten Initialkonfiguration eines Ausbaustufenkonzeptes unter kosten- und leistungsbezogenen Aspekten. Während zur kennzahlenbasierten Leistungsbewertung die multikriterielle Nutzwertanalyse dient, beruht die Kostenbewertung auf der szenariobasierten Lebenszykluskostenrechnung mit Kapitalwert.

Des Weiteren zeigte die Anwendung der entwickelten Methodik an einem Anwendungsbeispiel, dass damit die Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen möglich ist. Zur virtuellen Absicherung der entwickelten Zellkonfigurationen von Ausbaustufenkonzepten diente der Einsatz eines agentenbasierten Simulationsmodells. Basierend auf der **exemplarischen Anwendung** konnte somit die Methodik hinsichtlich Erfüllung der aufgestellten Anforderungen und des wirtschaftlichen Nutzens bestätigt werden. Folglich wurde mit der Arbeit ein Beitrag zur Planung des sukzessiven Ausbaus von digital, vernetzten Fertigungssystemen geleistet, da erstmalig CPPS-Spezifika bei der lebenszyklusorientierten Planung von modularen, skalierbaren Fertigungszellen berücksichtigt wurden.

8.2 Ausblick

Die vorliegende Forschungsarbeit stellt Produktionssystemplanern eine Methodik zur Planung modularer, skalierbarer Fertigungszellen in CPPS-Strukturen bereit. Darüber hinaus scheinen in Anbetracht zunehmender Relevanz von CPPS weiterführende Aktivitäten sinnvoll. Aufbauend auf der grundlegenden Struktur des Planungsansatzes wurde deshalb zusätzlicher Forschungsbedarf identifiziert.

Angesichts stetiger Entwicklungen im Umfeld von Industrie 4.0 ist damit zu rechnen, dass in naher Zukunft vielfältige CPPS-spezifische Anwendungen die nötige Technologiereife für die industrielle Serienproduktion erlangen werden. Mit dem in dieser Arbeit dargelegten intelligenzbezogenen Kompatibilitätsabgleich zur De-

definition CPPS-spezifischer Anforderungen auf System- (Fertigungszelle) und Objektebene (Produkt, Betriebsmittel) wurde eine generelle Grundlage für die Realisierung CPPS-spezifischer Anwendungen entwickelt. Aufgrund des Neuheitsgrades fehlt in den Unternehmen allerdings häufig Erfahrungswissen für die konkrete Ausgestaltung einzelner CPPS-Anwendungen, weshalb zur Erhöhung der Transparenz von Wirkzusammenhängen einzelner Merkmalsausprägungen weiterführende Forschungsaktivitäten von Relevanz sind. So kann als Basis für den Wissensaufbau ein **Regelwerk** für die Bestimmung relevanter Merkmalsausprägungen, wie auch ein umfassender Katalog mit exemplarischen Beispielen für die Realisierung konkreter CPPS-spezifischer Anwendungen, erarbeitet werden.

Ebenso besteht aufgrund der geringen Erfahrungswerte weiterer Forschungsbedarf in der transparenten Darstellung einzelner CPPS-spezifischer Anwendungen hinsichtlich deren kosten- und leistungsbezogenen Bewertung, um mit geringem Aufwand zu sinnvollen und fundierten Investitionsentscheidungen zu gelangen. Für die vergleichende Bewertung alternativer Anwendungen bietet sich die Entwicklung einer **Kennzahlensystematik** an, mit der insbesondere die Auswirkungen des steuerungstechnischen Einflusses auf einzelne Bewertungskriterien quantifizierbar sind. Ein zentrales Element für den notwendigen Wissensaufbau stellt die Untersuchung typischer Kostenfaktoren und Leistungspotenziale zu ausgewählten CPPS-spezifischen Anwendungen dar. Als Ausgangspunkt einer detaillierten Aufbereitung stehen in dieser Arbeit, neben den vorgestellten CPPS-spezifischen Anwendungen, die Bewertungskriterien des eingeführten Bewertungssystems und der Bewertungsansatz zur Verfügung.

Darüber hinaus zeigte sich bei Anwendung der Methodik, dass der Aufwand zur Modellierung von Zellkonfigurationen hoch ist. Es besteht daher die Möglichkeit, auf Grundlage dieser Arbeit die Funktionsweisen der Konfigurationsmodellierung in ein **wissensbasiertes Softwaresystem** zu implementieren. Ein solch softwaregestütztes Planungswerkzeug sollte neben der Verwaltung, Koordination und automatischen Konfiguration von wissens- bzw. regelbasierten Sachverhalten auch die Einbindung von Datenbanken und anderweitigen Werkzeugen der digitalen Fabrik ermöglichen. Aufgrund des höheren Grades an Planungsautomatisierung und -transparenz wird der Produktionssystemplaner somit bei der Erarbeitung von Zellkonfigurationen unterstützt. Im Rahmen von Entwicklungsaktivitäten ist dabei auf einen geeigneten Grad zu achten, um die planende Person nicht hinsichtlich dessen Kreativität und Entscheidungsfähigkeit einzuschränken.

Literaturverzeichnis

ABEL 1990

Abel, D.: Petri-Netze für Ingenieure. Modellbildung und Analyse diskret gesteuerter Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1990. ISBN: 978-3-642-95603-4.

ABELE ET AL. 2006

Abele, E.; Liebeck, T.; Wörn, A.: Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems. CIRP Annals 55 (2006) 1, S. 433-436.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser Verlag 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

ADOLPHS ET AL. 2015

Adolphs, P.; Bedenbender, H.; Dirzus, D.; Ehlich, M.; Epple, U.; Hankel, M.; Heidel, R.; Hoffmeister, M.; Huhle, H.; Kärcher, B.; Koziolk, H.; Pichler, R.; Pollmeier, S.; Schewe, F.; Walter, A.; Waser, B.; Wollschlaeger, M.: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). 2015.

ALDINGER 2009

Aldinger, L. A.: Methode zur strategischen Leistungsplanung in wandlungsfähigen Produktionsstrukturen des Mittelstandes. Dissertation. Universität Stuttgart. Stuttgart: Jost-Jetter Verlag 2009. ISBN: 978-3-939890-52-2. (IPA-IAO Forschung und Praxis 491).

ALT 2012

Alt, O.: Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. München: Carl Hanser Verlag 2012. ISBN: 978-3-446-43127-0.

ALTMANN 1991

Altmann, C.: Dynamische Prozeßgestaltung in flexiblen Fertigungssystemen durch integrierte Arbeitsvorbereitung. Dissertation. Technische Universität Berlin. München: Carl Hanser Verlag 1991. ISBN: 9783446165328. (Produktionstechnik - Berlin 95).

ANDERHOFSTADT & DISSELKAMP 2022

Anderhofstadt, R.; Disselkamp, M.: Disruptiver 3D-Druck. Neue Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsketten. München: Carl Hanser Verlag 2022. ISBN: 978-3-446-47021-7.

BACKHAUS 2016

Backhaus, J. C.: Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2016. ISBN: 978-3-8316-4570-1. (Forschungsberichte iw 319).

BACKHAUS & REINHART 2017

Backhaus, J.; Reinhart, G.: Digital description of products, processes and resources for task-oriented programming of assembly systems. *Journal of Intelligent Manufacturing* 28 (2017) 8, S. 1787-1800.

BAECKER ET AL. 2003

Baecker, P. N.; Hommel, U.; Lehmann, H.: Marktorientierte Investitionsrechnung bei Unsicherheit, Flexibilität und Irreversibilität - Eine Systematik der Bewertungsverfahren. In: Hommel, U. et al. (Hrsg.): *Reale Optionen. Konzepte, Praxis und Perspektiven strategischer Unternehmensfinanzierung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2003, S. 15-36. ISBN: 978-3-642-62473-5.

BALZERT 2005

Balzert, H.: *Lehrbuch der Objektmodellierung. Analyse und Entwurf mit der UML 2. 2., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 2005. ISBN: 978-3-8274-2903-2. (Lehrbücher der Informatik).

BARTODZIEJ 2017

Bartodziej, C. J.: *The Concept Industry 4.0. An Empirical Analysis of Technologies and Applications in Production Logistics*. Wiesbaden: Springer Gabler 2017. ISBN: 978-3-658-16502-4.

BAUER ET AL. 2019

Bauer, D.; Schumacher, S.; Gust, A.; Seidelmann, J.; Bauernhansl, T.: Characterization of Autonomous Production by a Stage Model. *Procedia CIRP* 81 (2019) 3, S. 192-197.

BAUERNHANSL ET AL. 2016

Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Schuh, G.: *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*. 2016.

BAUERNHANSL 2017

Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4. Allgemeine Grundlagen*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2017, S. 1-31. ISBN: 978-3-662-53254-6. (Springer Reference Technik).

BECKENDORFF 1991

Beckendorff, U.: Reaktive Belegungsplanung für die Werkstattfertigung. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991. ISBN: 3-18-143202-4. (Fortschritt-Berichte VDI / Reihe 2, Fertigungstechnik 232).

BECKER ET AL. 2006

Becker, M.; Wenning, B.-L.; Görg, C.; Gehrke, J. D.; Lorenz, M.; Herzog, O.: Agent-based and discrete event simulation of autonomous logistic process. In: Borutzky, W. et al. (Hrsg.): Modelling Methodologies and Simulation, Key Technologies in Academia and Industry, 20th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2006). Bonn, 28.-31.05.2006. Bonn: ECMS 2006, S. 566-571. ISBN: 0-9553018-0-7.

BEHRENDT 2009

Behrendt, A.: Entwicklung eines Modells zur Fertigungssystemplanung in der spanenden Fertigung. Dissertation. Technische Universität Darmstadt. Aachen: Shaker Verlag 2009. ISBN: 978-3-8322-8455-8. (Schriftenreihe des PTW: „Innovation Fertigungstechnik“).

BEHRENS ET AL. 2018

Behrens, B.-A.; Groche, P.; Krüger, J.; Wulfsberg, J. P.: WGP-Standpunkt Industriearbeitsplatz 2025. 2018.

BENKAMOUN 2016

Benkamoun, N.: Systemic design methodology for changeable manufacturing systems. Dissertation. Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand II (2016).

BERGHOLZ 2006

Bergholz, M. A.: Objektorientierte Fabrikplanung. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Shaker Verlag 2006. ISBN: 9783832257705. (Berichte aus der Produktionstechnik 31/2006).

BIEDERMANN ET AL. 2018

Biedermann, M.; Kamps, T.; Kiener, C.: Redesign of a Burner Tip with Multiple Integrated Flow Distributors. In: Müller, B. (Hrsg.): 4th Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC 2018). Berlin, 14.-15.03.2018. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2018, S. 389-395. ISBN: 9783839613207.

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L. T.M.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. London: Springer-Verlag 2009. ISBN: 978-1-84882-586-4.

BLUMENAU 2006

Blumenau, J.-C.: Lean Planning unter besonderer Berücksichtigung der Skalierung wandlungsfähiger Produktionssysteme. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken. Saarbrücken: Universität des Saarlandes Produktionstechnik 2006. ISBN: 978-3-930429-65-3. (Schriftenreihe Produktionstechnik 36).

BOGNER ET AL. 2017

Bogner, E.; Kästle, C.; Franke, J.; Beitinger, G.: Intelligent vernetzte Elektronikproduktion. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser Verlag 2017, S. 653-690. ISBN: 978-3-446-44989-3.

BOKRANZ & LANDAU 2012

Bokranz, R.; Landau, K.: Handbuch Industrial Engineering. Produktivitätsmanagement mit MTM. Band 1: Konzept. Deutsche MTM-Vereinigung e.V. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag 2012. ISBN: 978-3-7910-2863-7.

BONDUELLE ET AL. 2003

Bonduelle, Y.; Schmoldt, I.; Scholich, M.: Anwendungsmöglichkeiten der Realloptionsbewertung. In: Hommel, U. et al. (Hrsg.): Reale Optionen. Konzepte, Praxis und Perspektiven strategischer Unternehmensfinanzierung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2003, S. 3-13. ISBN: 978-3-642-62473-5.

BONGULIELMI 2002

Bongulielmi, L.: Die Konfigurations- & Verträglichkeitsmatrix als Beitrag zur Darstellung konfigurationsrelevanter Aspekte im Produktentstehungsprozess. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (2002).

BÖSE 2012

Böse, F.: Selbststeuerung in der Fahrzeuglogistik. Modellierung und Analyse selbststeuernder logistischer Prozesse in der Auftragsabwicklung von Automobilterminals. Dissertation. Universität Bremen. Berlin: GITO-Verlag 2012. ISBN: 978-3-942183-79-6. (Informationstechnische Systeme und Organisation von Produktion und Logistik 14).

BROWNE ET AL. 1984

Browne, J.; Dubois, D.; Rathmill, K.; Sethi, S. P.; Stecke, K. E.: Classification of flexible manufacturing systems. The FMS Magazine - Flexible Manufacturing Systems 2 (1984) 2, S. 114-117.

BUßMANN 1983

Bußmann, J.: Methodik zum stufenweisen Aufbau neuer Fertigungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung kleiner und mittlerer Unternehmen. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 1983. ISBN: 3-18-141816-1. (Fortschritt-Berichte VDI / Reihe 16, Technik und Wirtschaft 18).

BUTSCHEK 2020

Butschek, M.: Digitale Fabrik – Das Digital Enterprise in der Industrie. In: Fend, L. et al. (Hrsg.): Digitalisierung in Industrie-, Handels- und Dienstleistungsunternehmen. Konzepte - Lösungen - Beispiele. 2., aktualisierte und überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler 2020, S. 161-182. ISBN: 978-3-658-26964-7.

CADET ET AL. 2017

Cadet, M.; Sinnwell, C.; Fischer, J.; Rosen, R.; Stephan, N.; Meissner, H.: Referenzentwicklungsprozess für cybertronische Produkte und Produktionssysteme. In: Eigner, M. et al. (Hrsg.): Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme. Der PLM-unterstützte Referenzentwicklungsprozess für Produkte und Produktionssysteme. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2017, S. 45-62. ISBN: 978-3-662-55123-3.

CASTELLINI ET AL. 2011

Castellini, P.; Cristalli, C.; Foehr, M.; Leitao, P.; Paone, N.; Schjolberg, I.; Tjonnas, J.; Turrin, C.; Wagner, T.: Towards the integration of process and quality control using multi-agent technology. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): Proceedings IECON 2011 - 37th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne, 07.-10.11.2011. Piscataway: IEEE 2011, S. 421-426. ISBN: 978-1-61284-972-0.

CIRP 2020

CIRP: Dictionary of Production Engineering III – Manufacturing Systems, Wörterbuch der Fertigungstechnik III – Produktionssysteme, Dizionario di Ingegneria della Produzione III – Sistemi di produzione. Trilingual Edition, Dreisprachige Ausgabe, Edizione completa trilingue. CIRP. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2020. ISBN: 978-3-662-53334-5.

CISEK ET AL. 2002

Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (2002) 9, S. 441-445.

CISEK 2005

Cisek, R.: Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2005. ISBN: 3-8316-0475-4. (Forschungsberichte iw 191).

CLAUSSEN 2012

Claussen, P.: Die Fabrik als soziales System. Wandlungsfähigkeit durch systemische Fabrikplanung und Organisationsentwicklung – ein Beispiel aus der Automobilindustrie. Wiesbaden: Springer Gabler 2012. ISBN: 978-3-8349-4377-4.

CÜPPERS 2018

Cüppers, M.: Die Zukunft des Karosseriebaus: maximal flexibel. Die „Boxenstoppfertigung“ als Antwort auf die aktuellen Herausforderungen in der Automobilproduktion. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (2018) 7-8, S. 475-478.

DANGELMAIER 2001

Dangelmaier, W.: Fertigungsplanung. Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung - Grundlagen Algorithmen und Beispiele. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2001. ISBN: 978-3-642-56453-6. (VDI-Buch).

DANGELMAIER ET AL. 2013

Dangelmaier, M.; Westner, P.; Sulzmann, F.: Mixed Reality Environments für die montagegerechte Konstruktion und Montageplanung von komplexen Produkten. In: Westkämper, E. et al. (Hrsg.): Digitale Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013, S. 223-240. ISBN: 978-3-642-20259-9.

DANGELMAIER & WARNECKE 1997

Dangelmaier, W.; Warnecke, H.-J.: Fertigungslenkung. Planung und Steuerung des Ablaufs der diskreten Fertigung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1997. ISBN: 978-3-642-60860-5.

DAVIDSSON 2001

Davidsson, P.: Multi Agent Based Simulation: Beyond Social Simulation. In: Moss, S. et al. (Hrsg.): Multi-Agent-Based Simulation. Second International Workshop, MABS 2000 Boston, MA, USA, July 2000, Revised and Additional Papers. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 2001, S. 97-107. ISBN: 3-540-41522-X.

DECKERT & KLEIN 2010

Deckert, A.; Klein, R.: Agentenbasierte Simulation zur Analyse und Lösung

betriebswirtschaftlicher Entscheidungsprobleme. Journal für Betriebswirtschaft 60 (2010) 2, S. 89-125.

DEINDL 2013

Deindl, M.: Gestaltung des Einsatzes von intelligenten Objekten in Produktion und Logistik. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Apprimus Verlag 2013. ISBN: 978-3-86359-156-4. (Schriftenreihe Rationalisierung 118).

DEUSE ET AL. 2014

Deuse, J.; Weisner, K.; Hengstebeck, A.; Busch, F.: Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0. In: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.): Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0, S. 43-49.

DIN 8580

DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth Verlag 2003.

DIN 8593-0

DIN 8593-0: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag 2003.

DIN 8589-2

DIN 8589-2: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 2: Bohren, Senken, Reiben - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag 2003.

DIN EN 60300-3-3

DIN EN 60300-3-3: Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten. Berlin: Beuth Verlag 2014.

DIN EN ISO 1101

DIN EN ISO 1101: Geometrische Produktspezifikation GPS - Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf. Berlin: Beuth Verlag 2017.

DRABOW 2006

Drabow, G.: Modulare Gestaltung und ganzheitliche Bewertung wandlungsfähiger Fertigungssysteme. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2006. ISBN: 3-939026-13-1. (Berichte aus dem IFW 05/2006).

DRATH & SCHLEIPEN 2010

Drath, R.; Schleipen, M.: Grundarchitektur: das Objektmodell. In: Drath, R.

(Hrsg.): Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2010, S. 45-94. ISBN: 978-3-642-04674-2.

DROSSEL ET AL. 2018

Drossel, W.-G.; Ihlenfeldt, S.; Langer, T.; Dumitrescu, R.: Cyber-Physische Systeme. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Digitalisierung. Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2018, 197-222. ISBN: 978-3-662-55890-4. (Fraunhofer-Forschungsfokus).

DUMITRESCU ET AL. 2018a

Dumitrescu, R.; Westermann, T.; Falkowski, T.: Autonome Systeme in der Produktion. Planungssystematik für die Entwicklung autonomer Systeme. Industrie 4.0 Management 34 (2018) 6, S. 17-20.

DUMITRESCU ET AL. 2018b

Dumitrescu, R.; Gausemeier, J.; Slusallek, P.; Cieslik, S.; Demme, G.; Falkowski, T.; Hoffmann, H.; Kadner, S.; Reinhart, F.; Westermann, T.; Winter, J.: Studie „Autonome Systeme“. 2018.

DÜRKOP & JASPERNEITE 2017

Dürkop, L.; Jasperneite, J.: „Plug & Produce“ als Anwendungsfall von Industrie 4.0. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2. Automatisierung. 2., erweiterte und bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2017, S. 59-71. ISBN: 978-3-662-53248-5. (Springer Reference Technik).

EHRENSPIEL ET AL. 2014

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.; Mörtl, M.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-642-41959-1.

EIGNER 2014

Eigner, M.: Technische Organisation des Produktentwicklungsprozesses. In: Eigner, M. et al. (Hrsg.): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin: Springer Vieweg 2014, S. 227-266. ISBN: 978-3-662-43816-9.

EIGNER & STELZER 2009

Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. 2., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2009. ISBN: 978-3-540-68401-5.

EILERS 2015

Eilers, J.: Methodik zur Planung skalierbarer und rekonfigurierbarer Montagesysteme. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Apprimus Verlag 2015. ISBN: 978-3-86359-295-0. (Fertigungsmesstechnik & Qualitätsmanagement 9/2015).

ELMARAGHY 2006

ElMaraghy, H. A.: Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 17 (2006) 4, S. 261-276.

ELMARAGHY ET AL. 2009

ElMaraghy, H. A.; Azab, A.; Schuh, G.; Pulz, C.: Managing variations in products, processes and manufacturing systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2009) 1, S. 441-446.

ELMARAGHY & WIENDAHL 2009

ElMaraghy, H. A.; Wiendahl, H.-P.: Changeability – An Introduction. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. London: Springer-Verlag 2009, S. 3-24. ISBN: 978-1-84882-067-8.

EMMELMANN ET AL. 2017

Emmelmann, C.; Möhrle, M.; Möller, M.; Rudolph, J.-P.; D'Agostino, N.: Bionic Smart Factory 4.0. Konzept einer Fabrik zur additiven Fertigung komplexer Produktionsprogramme. *Industrie 4.0 Management* 33 (2017) 4, S. 38-42.

EVERSHEIM 1989

Eversheim, W.: *Organisation in der Produktionstechnik Band 4. Fertigung und Montage*. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Düsseldorf: VDI Verlag 1989. ISBN: 978-3-642-64800-7.

FALLBÖHMER 2000

Fallböhrer, M.: Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Shaker Verlag 2000. ISBN: 3-8265-7794-9. (Berichte aus der Produktionstechnik 23/2000).

FELDKAMP ET AL. 2019

Feldkamp, N.; Bergmann, S.; Straßburger, S.: Modellierung und Simulation von modularen Produktionssystemen. In: Putz, M. et al. (Hrsg.): 18. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik 2019. Chemnitz, 18.-

20.09.2019. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Skripten 2019, S. 391-401.
ISBN: 978-3-95735-114-2. (ASIM-Mitteilung AM 172).

FELDMANN 1997

Feldmann, C.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung. Dissertation. Technische Universität München. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1997. ISBN: 978-3-540-62059-4. (Forschungsberichte iw 104).

FINK & SIEBE 2016

Fink, A.; Siebe, A.: Szenario-Management. Von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrobusten Entscheidungen. Frankfurt, New York: Campus Verlag 2016. ISBN: 3593506033.

FISCHER ET AL. 2017

Fischer, J.; Willers, R.; Sinnwell, C.: Materialflusssimulation für die CTPS Entwicklung. In: Eigner, M. et al. (Hrsg.): Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme. Der PLM-unterstützte Referenzentwicklungsprozess für Produkte und Produktionssysteme. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2017, S. 131-138. ISBN: 978-3-662-55123-3.

FISEL 2019

Fisel, J.: Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme. Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. Düren: Shaker Verlag 2019. ISBN: 978-3-8440-6804-7. (Forschungsberichte aus dem wbk 226).

FOCKE & STEINBECK 2018

Focke, M.; Steinbeck, J.: Steigerung der Anlagenproduktivität durch OEE-Management. Definitionen, Vorgehen und Methoden - Von manuell bis Industrie 4.0. Wiesbaden: Springer Gabler 2018. ISBN: 978-3-658-21456-2.

FRANKE ET AL. 2010

Franke, J.; Merhof, J.; Fischer, C.; Risch, F.: Intelligente Steuerungskonzepte für wandlungsfähige Produktionssysteme. Industrie Management 26 (2010) 2, S. 61-64.

FROHM ET AL. 2005

Frohm, J.; Lindström, V.; Bellgran, M.: A model for parallel levels of automation within manufacturing. In: The International Foundation for Production Research (Hrsg.): Conference Proceedings, 18th International Conference on Production Research (ICPR-18). Salerno, 31.07.-4.08.2005. Salerno: University of Salerno 2005.

FROHM ET AL. 2008

Frohm, J.; Lindström, V.; Stahre, J.; Winroth, M.: Levels of Automation in Manufacturing. *Ergonomia - An International Journal of Ergonomics and Human Factors* 30 (2008) 3, S. 181-207.

FROHM 2008

Frohm, J.: Levels of automation in production systems. Dissertation. Chalmers University of Technology Göteborg. Göteborg: Chalmers University of Technology 2008. ISBN: 978-91-7385-055-1. (Doktorsavhandlingar vid Chalmers Tekniska Högskola 2736).

GAUSEMEIER ET AL. 1996

Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: Szenario-Management. Planen und Führen mit Szenarien. 2., bearbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag 1996. ISBN: 3446187219.

GAUSEMEIER ET AL. 2018

Gausemeier, J.; Iwanek, P.; Trächtler, A.; Lüke, C.; Timmermann, J.; Dumitrescu, R.: Paradigma der Selbstoptimierung. In: Trächtler, A. et al. (Hrsg.): Steigerung der Intelligenz mechatronischer Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2018, S. 20-37. ISBN: 978-3-662-56392-2. (Intelligente Technische Systeme - Lösungen aus dem Spitzencluster It's OWL).

GEBHARDT 2018

Gebhardt, R.: Arbeitsgruppe Additive Fertigung im VDMA. Additive Fertigung - Das Fachmagazin für Rapid Prototyping, -Tooling, -Manufacturing (2018) 1, S. 16-17.

GEIGER 2015

Geiger, F.: System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2015. ISBN: 978-3-8316-4537-4. (Forschungsberichte iw 311).

GEISBERGER ET AL. 2011

Geisberger, E.; Cengarle, M. V.; Keil, P.; Niehaus, J.; Thiel, C.; Thönnißen-Fries, H.-J.: Cyber-Physical Systems - Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion. 2011.

GEISBERGER ET AL. 2012

Geisberger, E.; Broy, M. H.; Cengarle, M. V.; Keil, P.; Niehaus, J.; Thiel, C.; Thönnißen-Fries, H.-J.: AgendaCPS. Integrierte Forschungsagenda Cyber-

Physical Systems. acatech Studie. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2012. ISBN: 978-3-642-29099-2.

GOLL 2011

Goll, J.: Methoden und Architekturen der Softwaretechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2011. ISBN: 978-3-8348-1578-1.

GONZÁLEZ GARCÍA ET AL. 2017

González García, C.; Meana-Llorián, D.; Pelayo G-Bustelo, C.; Cueva Lovelle, J. M.: A review about Smart Objects, Sensors, and Actuators. International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence 4 (2017) 3, S. 7-10.

GÖPFERT 1998

Göpfert, J.: Modulare Produktentwicklung. Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Dissertation. Technische Universität München. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 1998. ISBN: 978-3-8244-6827-0.

GÖPPERT ET AL. 2021

Göppert, A.; Schukat, E.; Burggräf, P.; Schmitt, R. H.: Agile Hybrid Assembly Systems: Bridging the Gap Between Line and Matrix Configurations. In: Weißgraeber, P. et al. (Hrsg.): Advances in Automotive Production Technology - Theory and Application, Stuttgart Conference on Automotive Production (SCAP2020). Stuttgart, 16.-18.11.2022. Berlin: Springer Vieweg 2021, S. 3-11. ISBN: 978-3-662-62961-1. (ARENA2036).

GORECKY ET AL. 2017

Gorecky, D.; Hennecke, A.; Schmitt, M.; Weyer, S.; Zühlke, D.: Wandelbare modulare Automatisierungssysteme. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser Verlag 2017, S. 555-583. ISBN: 978-3-446-44989-3.

GÖTZE 2014

Götze, U.: Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2014. ISBN: 978-3-642-54622-8.

GRÄBLER 2004

Gräßler, I.: Kundenindividuelle Massenproduktion. Entwicklung, Vorbereitung der Herstellung, Veränderungsmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2004. ISBN: 978-3-642-18681-3.

GRESCHKE 2020

Greschke, P.: Matrix-Produktion. Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung. Neuauflage der Promotionsarbeit von 2016. Norderstedt: BoD - Books on Demand 2020. ISBN: 978-375-267-0004.

GRONAU 2015

Gronau, N.: Der Einfluss von Cyber-Physical Systems auf die Gestaltung von Produktionssystemen. *Industrie 4.0 Management* 31 (2015) 3, S. 16-20.

GRONAU 2016

Gronau, N.: Determinants of an Appropriate Degree of Autonomy in a Cyber-physical Production System. *Procedia CIRP* 52 (2016), S. 1-5.

GRONAU ET AL. 2016

Gronau, N.; Grum, M.; Bender, B.: Determining the optimal level of autonomy in cyber-physical production systems. In: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hrsg.): *Proceedings 14th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2016)*. Poitiers, 19.-21.07.2016. Piscataway: IEEE 2016, S. 1293-1299. ISBN: 978-1-5090-2870-2.

GRONAU 2018

Gronau, N.: Der angemessene Grad von Autonomie in Cyber-Physischen Produktionssystemen. *Industrie 4.0 Management* 34 (2018) 6, S. 7-12.

GRONAU 2019

Gronau, N.: Autonomie als Planungsparameter von Industrie 4.0-Fabriken. *Fabriksoftware* 24 (2019) 1, S. 29-32.

GRUM ET AL. 2016

Grum, M.; Dehnert, M.; Vollmer, F.; Zhao, M.: The Conception of a Cyber-Physical Market Model as Coordination Instrument for Production Systems. Work Report WI - 2016 - 02. Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik (LSWI), Universität Potsdam (2016). <https://lswi.de/assets/downloads/publikationen/110/Grum_The_Conception_of_a_Cyber-Physical_market_Model_as_Coordination_Instrument_for_Production_Systems.pdf> - 05.04.2022.

GRUNDIG 2018

Grundig, C.-G.: *Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*. 6., neu bearbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag 2018. ISBN: 9783446454019.

GRUNDSTEIN 2017

Grundstein, S.: *Fertigungsregelung flexibler Fließfertigungen und Werkstatt-*

fertigungen zur Einhaltung von Lieferterminen. Integration von Auftragsfreigabe, Arbeitsverteilung, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung unter Nutzung des Potenzials Cyber-Physischer Produktionssysteme. Dissertation. Universität Bremen. München: GRIN Verlag 2017. ISBN: 9783668463561.

GÜNTHNER ET AL. 2006

Günthner, W. A.; Wilke, M.; Zäh, M. F.; Aull, F.; Rudolf, H.: Produktion individualisierter Produkte. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Individualisierte Produkte. Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S. 63-87. ISBN: 978-3-540-25506-2.

HAMMERSTINGL 2020

Hammerstingl, V. G.: Steigerung der Rekonfigurationsfähigkeit von Montageanlagen durch Cyber-physische Feldgeräte. Dissertation. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München (2020).

HAMMERSTINGL & REINHART 2017

Hammerstingl, V. G.; Reinhart, G.: Fähigkeiten in der Montage. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München (2017). <<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1370174/1370174.pdf>> - 05.04.2022.

HARTMANN 1992

Hartmann, C.: Einsatzkriterien für die Planung von praxisnahen wirtschaftlich begründbaren Automatisierungsstufen bei der Bohr- und Fräsbearbeitung. Dissertation. Universität Stuttgart. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 9783181472026. (Fortschritt-Berichte VDI / Reihe 2, Fertigungstechnik 272).

HAWER 2020

Hawer, S.: Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen auf Basis unscharfer Daten. Dissertation. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München (2020).

HEES 2017

Hees, A.: System zur Produktionsplanung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen. Dissertation. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München (2017).

HEGER 2007

Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Garbsen: PZH Verlag 2007. ISBN: 978-3-939026-43-3. (Berichte aus dem IFA 1/2007).

HEINEN ET AL. 2008

Heinen, T.; Rimpau, C.; Wörn, A.: Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis, P. et al. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH Verlag 2008, S. 19-32. ISBN: 978-3-939026-96-9.

HEINRICH ET AL. 2020

Heinrich, B.; Linke, P.; Glöckler, M.: Grundlagen Automatisierung. Erfassen - Steuern - Regeln. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2020. ISBN: 978-3-658-27323-1.

HELLMICH ET AL. 2022

Hellmich, A.; Zumpe, F.; Zumpe, M.; Münnich, M.; Wiese, T.; Büttner, T.; Ihlenfeldt, S.; Foith-Förster, P.; Trierweiler, M.; Ranke, D.; Berkhan, P.; Rzesnitzek, S.; Bauernhansl, T.: Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen. 2022.

HERNÁNDEZ MORALES 2003

Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 2003. ISBN: 9783183149162. (Fortschritt-Berichte VDI / Reihe 16, Technik und Wirtschaft 149).

HEYN 1999

Heyn, M.: Methodik zur schnittstellenorientierten Gestaltung von Entwicklungskooperationen. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Shaker Verlag 1999. ISBN: 3826547071. (Berichte aus der Produktionstechnik 99, 6).

HILDEBRAND 2005

Hildebrand: Theoretische Grundlagen der bausteinbasierten, technischen Gestaltung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen nach dem PLUG+PRODUCE-Prinzip. Dissertation. Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme (IBF), Technische Universität Chemnitz-Zwickau (2005).

HIRSCH-KREINSEN 2014

Hirsch-Kreinsen, H.: Entwicklungsperspektiven von Produktionsarbeit.

In: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.): Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0, S. 37-42.

HÖRAUF 2019

Hörauf, L.: Software-gestützte Planung cyber-physischer Montagesysteme mittels durchgängiger Informationsnutzung. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Düren: Shaker Verlag 2019. ISBN: 978-3-8440-6674-6. (Forschungsberichte Montagetechnik und -organisation 4).

HORLER & MÜLLER 2017

Horler, S.; Müller, E.: Strukturplanung zukünftiger Produktionssysteme. Die erforderliche Transformation für die Planung und den Betrieb der Smart Factory. *Industrie 4.0 Management* 33 (2017) 3, S. 53-58.

HUMPERT ET AL. 2024

Humpert, L.; Disselkamp, J.-P.; Schierbaum, A.; Zagatta, K.; Dumitrescu, R.: *Engineering Autonom Wandelbarer Industrie 4.0-Systeme*. 2024.

JONAS 2000

Jonas, C.: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2000. ISBN: 3-89675-870-5. (Forschungsberichte iw 145).

KAPPLER & REHKUGLER 1991

Kappler, E.; Rehkugler, H.: Kapitalwirtschaft. In: Heinen, E. (Hrsg.): *Industriebetriebslehre. Entscheidungen im Industriebetrieb*. 9., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler 1991, S. 897-1068. ISBN: 978-3-322-87161-9.

KARL 2015

Karl, F.: Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2015. ISBN: 978-3-8316-7120-5. (Forschungsberichte iw 298).

KAUFMANN & FORSTNER 2017

Kaufmann, T.; Forstner, L.: Horizontale Integration der Wertschöpfungskette in der Halbleiterindustrie. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1. Produktion*. 2., erweiterte und bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2017, S. 95-103. ISBN: 978-3-662-45279-0. (Springer Reference Technik).

KERN 2021

Kern, W.: *Modulare Produktion. Methodik zur Gestaltung eines modularen Montagesystems für die variantenreiche Serienmontage im Automobilbau*.

Dissertation. Universität Stuttgart. Wiesbaden: Springer Vieweg 2021.
ISBN: 978-3-658-36300-0.

KETTNER ET AL. 1984

Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München: Carl Hanser Verlag 1984. ISBN: 3-446-13825-0.

KIEFER ET AL. 2019

Kiefer, L.; Voit, P.; Richter, C.; Reinhart, G.: Attribute-based identification processes for autonomous manufacturing systems – an approach for the integration in factory planning methods. In: Teti, R. et al. (Hrsg.): 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (CIRP ICME 2018). Neapel, 18.-20.07.2018: Elsevier Procedia 2019, S. 204-209. (Procedia CIRP 79).

KIEFER 2020

Kiefer, L.: Gestaltung und Planung von merkmals- und agentenbasierten Selbststeuerungssystemen. Dissertation. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München (2020).

KINSCHHEL 2018

Kinschel, M.: Digitalisierung bei Siemens - dargestellt am Beispiel von Additive Manufacturing. In: Fend, L. et al. (Hrsg.): Digitalisierung in Industrie-, Handels- und Dienstleistungsunternehmen. Konzepte - Lösungen - Beispiele. Wiesbaden: Springer Gabler 2018, S. 301-311. ISBN: 978-3-658-21905-5.

KLEMKE ET AL. 2012

Klemke, T.; Mersmann, T.; Nyhuis, P.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Methodik zur Bewertung und Gestaltung der Wandlungsfähigkeit. wt Werkstattstechnik 102 (2012) 4, S. 222-227.

KLEMKE 2014

Klemke, T.: Planung der systemischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Garbsen: PZH Verlag 2014. ISBN: 978-3-944586-50-2. (Berichte aus dem IFW 01/2014).

KLUGE 2011

Kluge, S. J.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Dissertation. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag 2011. ISBN: 978-3-939890-81-2. (IPA-IAO Forschung und Praxis 510).

KLUBMANN ET AL. 2005

Klußmann, J. H.; Nofen, D.; Löllmann, F.: Einleitung. In: Wiendahl, H.-P. et

al. (Hrsg.): Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2005, S. 1-15. ISBN: 3-446-40045-1.

KNOCHE 2005

Knoche, K.: Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Shaker Verlag 2005. ISBN: 3-8322-3799-2. (Berichte aus der Produktionstechnik 5/2005).

KÖCHLING 2018

Köchling, D.: Systematik zur integrativen Planung des Verhaltens selbstoptimierender Produktionssysteme. Dissertation. Universität Paderborn. Paderborn: Universität Paderborn 2018. ISBN: 978-3-947647-01-9. (Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts 382).

KOLBERG ET AL. 2017

Kolberg, D.; Marseu, E.; Gorecky, D.; Koch, J.; Plehn, C.; Zühlke, D.; Reinhart, G.: Strategien zur Transformation der Produktionsumgebung. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser Verlag 2017, S. 213-256. ISBN: 978-3-446-44989-3.

KOREN ET AL. 1999

Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G.; Brussel, H. Van: Reconfigurable Manufacturing Systems. CIRP Annals - Manufacturing Technology 48 (1999) 2, S. 527-540.

KOREN 2010

Koren, Y.: The Global Manufacturing Revolution. Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems. Hoboken, New Jersey: Wiley 2010. ISBN: 978-0-470-58377-7. (Wiley Series in Systems Engineering and Management).

KORTUEM ET AL. 2010

Kortuem, G.; Kawsar, F.; Sundramoorthy, V.; Fitton, D.: Smart Objects as Building Blocks for the Internet of Things. IEEE Internet Computing 14 (2010) 1, S. 44-51.

KOSTE & MALHOTRA 1999

Koste, L. L.; Malhotra, M. K.: A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility. Journal of Operations Management 18 (1999) 1, S. 75-93.

KRÜGER 2004

Krüger, A.: Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2004. ISBN: 3-8316-0371-5. (Forschungsberichte iw 186).

KÜBER 2017

Küber, C.: Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen in der variantenreichen Serienmontage. Dissertation. Universität Stuttgart. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2017. ISBN: 978-3-8396-1232-3. (Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 69).

KUBICEK 1977

Kubicek, H.: Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung. In: Köhler, R. (Hrsg.): Empirische und handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der Betriebswirtschaftslehre. Bericht über die Tagung in Aachen, März 1976. Stuttgart: Poeschel Verlag 1977, S. 3-36. ISBN: 3-7910-0214-7.

LANDHERR 2014

Landherr, M. H.: Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung. Dissertation. Universität Stuttgart. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2014. ISBN: 978-3-8396-0809-8. (Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 39).

LANZA ET AL. 2017

Lanza, G.; Kopf, R.; Zaiß, M.; Stricker, N.; Eschner, N.; Jacob, A.; Yang, S.; Schönle, A.; Webersinke, L.; Wirsig, L.: Laser-Strahlschmelzen - Technologie mit Zukunftspotenzial. Ein Handlungsleitfaden. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik. Karlsruhe 2017. ISBN: 978-3-00-056913-5.

LASS ET AL. 2013

Lass, S.; Theuer, H.; Hennig, G.; Schumacher, J.: Modellierung intelligenter Produktionssysteme. *PRODUCTIVITY Management* 18 (2013) 1, S. 47-50.

LASS 2017

Lass, S.: Simulationskonzept zur Nutzvalidierung cyber-physischer Systeme in komplexen Fabrikumgebungen. Dissertation. Universität Paderborn. Berlin: GITO-Verlag 2017. ISBN: 978-3955452247.

LAU 2010

Lau, C.: Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2010. ISBN: 978-3-8316-4012-6. (Forschungsberichte iw 238).

LEE ET AL. 2015

Lee, J.; Bagheri, B.; Kao, H.-A.: A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters* 3 (2015), S. 18-23.

LEE & WANG 2008

Lee, J.; Wang, H.: New technologies for maintenance. In: Kobbacy, K. A. H. et al. (Hrsg.): *Complex System Maintenance Handbook*. London: Springer-Verlag 2008, S. 49-78. ISBN: 978-1-84800-011-7.

LEWIN & FAY 2018

Lewin, M.; Fay, A.: Charakteristik intelligenter Objekte in einer digitalisierten Logistik. *Industrie 4.0 Management* 34 (2018) 5, S. 21-24.

LICHTBLAU ET AL. 2015

Lichtblau, K.; Stich, V.; Bertenrath, R.; Blum, M.; Bleider, M.; Millack, A.; Schmitt, K.; Schmitz, E.; Schröter, M.: *Industrie 4.0-Readiness*. Aachen, Köln 2015.

LINDEMANN & MAURER 2006

Lindemann, U.; Maurer, M.: Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): *Individualisierte Produkte. Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S. 41-62. ISBN: 978-3-540-25506-2.

LOFERER 2002

Loferer, M.: Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2002. ISBN: 3-8316-0118-6. (Forschungsberichte iw 162).

LÖFFLER 2011

Löffler, C.: Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung. Dissertation. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag 2011. ISBN: 978-3-939890-90-4. (IPA-IAO Forschung und Praxis 519).

LORENZER 2011

Lorenzer, T.: Wandelbarkeit in der Serienfertigung durch rekonfigurierbare

Werkzeugmaschinen. Dissertation. Innovative Werkzeugmaschinen und Fertigung (inspire-iwf), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (2011).

LOTTER 2012

Lotter, B.: Einführung. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 1-8. ISBN: 978-3-642-29061-9.

LUCZAK & EVERSHEIM 1999

Luczak, H.; Eversheim, W.: Einführung. In: Luczak, H. et al. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 2. korrigierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1999, S. 3-5. ISBN: 978-3-662-09472-3. (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).

MARTINO 1993

Martino, J. P.: Technological Forecasting for Decision Making. 3. Auflage. New York: McGraw-Hill 1993. ISBN: 0-07-040777-0.

MASAK 2007

Masak, D.: SOA? Serviceorientierung in Business und Software. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2007. ISBN: 978-3-540-71871-0.

MATTERN & FLÖRKEMEIER 2010

Mattern, F.; Flörkemeier, C.: Vom Internet der Computer zum Internet der Dinge. Informatik Spektrum 33 (2010) 2, S. 107-121.

MAZUR 2023

Mazur, S. (Hrsg.): Industrial revolution 4.0. Economic foundations and practical implications. New York: Routledge 2023. ISBN: 978-1-003-26417-0. (Routledge studies in the economics of innovation).

McFARLANE ET AL. 2003

McFarlane, D.; Sarma, S.; Chirn, J. L.; Wong, C. Y.; Ashton, K.: The intelligent product in manufacturing control and management. In: Camacho, E. F. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control. Barcelona, 21.-26.07.2002. Oxford: Pergamon 2003, S. 49-54. (IFAC proceedings).

MEHRABI ET AL. 2002

Mehrabi, M. G.; Ulsoy, A. G.; Koren, Y.; Heytler, P.: Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems. Journal of Intelligent Manufacturing 13 (2002) 2, S. 135-146.

MICHNIEWICZ 2019

Michniewicz, J. J.: Automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung in der Montage. Dissertation. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München (2019).

MÖHRLE 1989

Möhrle, M.: Petrinetze in der Produktionstechnik - Integration von Planung, Simulation und Steuerung von Produktionsanlagen. Dissertation. Lehrstuhl für Produktionssysteme und Prozessleittechnik, Ruhr-Universität Bochum (1989).

MÖHRLE 2018

Möhrle, M.: Gestaltung von Fabrikstrukturen für die Additive Fertigung. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2018. ISBN: 978-3-662-57707-3.

MÖLLER 2008

Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2008. ISBN: 978-3-8316-0778-5. (Forschungsberichte iwb 212).

MONOSTORI ET AL. 2016

Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S. R.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; Sihm, W.; Ueda, K.: Cyber-physical systems in manufacturing. CIRP Annals - Manufacturing Technology 65 (2016) 2, S. 621-641.

MORYSON 2004

Moryson, R.-D.: Die systematische, rechnerunterstützte Prozessauswahl und -kettenerstellung in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004. ISBN: 978-3-18338-820-2. (Fortschritt-Berichte VDI / Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren Nr. 388).

MOSER 2014

Moser, R.: Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke. Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. Aachen: Shaker Verlag 2014. ISBN: 978-3-8440-2823-2. (Forschungsberichte aus dem wbk 185).

MOSER 2018

Moser, E.: Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke. Bestimmung

robuster Migrationspfade und risikoeffizienter Wandlungsbefähiger. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. Aachen: Shaker Verlag 2018. ISBN: 978-3-8440-5797-3. (Forschungsberichte aus dem wbk 210).

MÜLLER 2008

Müller, S.: Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2008. ISBN: 978-3-8316-0750-1. (Forschungsberichte iw 209).

MÜLLER ET AL. 2015

Müller, R.; Eilers, J.; Hörauf, L.; Hermanns, L.: Modell zur fähigkeitsbasierten Montageplanung. Fähigkeitsbasierte Bewertung von Produktänderungen am Beispiel der Motormontage. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (2015) 9, S. 553-557.

MÜLLER ET AL. 2017

Müller, F. G.; Röber, T.; Bauernhansl, T.: Klassifikation von Selbstoptimierungsansätzen für Fertigungssysteme. Methode zur Auswahl eines maschinellen Optimierungsansatzes für verkettete Fertigungsprozesse. wt Werkstattstechnik 107 (2017) 3, 154-162.

NEUHAUSEN 2001

Neuhausen, J.: Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Dissertation. Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL), Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen (2001).

NEUMANN 2015

Neumann, M.: Methode für eine situationsbasierte Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit in der Serienmontage. Dissertation. Universität Stuttgart. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2015. ISBN: 978-3-8396-0816-6. (Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 40).

NOCHTA 2008

Nochta, Z.: Smart Items in Real Time Enterprises. In: Mühlhäuser, M. et al. (Hrsg.): Handbook of Research on Ubiquitous Computing Technology for Real Time Enterprises. Hershey: IGI Global 2008, 211-228. ISBN: 978-1-59904-832-1.

NOF 2009

Nof, S. Y.: Automation: What It Means to Us Around the World. In: Nof, S.

Y. (Hrsg.): Springer Handbook of Automation. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2009, S. 13-52. ISBN: 978-3-540-78831-7.

NYHUIS ET AL. 2007

Nyhuis, P.; Heinen, T.; Brieke, M.: Adequate and economic factory transformability and the effects on logistical performance. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 19 (2007) 3, S. 286-307.

NYHUIS ET AL. 2008

Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. *wt Werkstattstechnik* 98 (2008) 1/2, S. 85-91.

NYHUIS ET AL. 2014

Nyhuis, P.; Mayer, J.; Kuprat, T.: Die Bedeutung von Industrie 4.0 als Enabler für logistische Modelle. In: Kersten, W. et al. (Hrsg.): *Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*. Berlin: GITO-Verlag 2014, S. 79-100. ISBN: 978-3-95545-083-0. (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e. V. (HAB)).

OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2012. ISBN: 978-3-8316-4206-9. (Forschungsberichte iw 265).

OWODUNNI ET AL. 2002

Owodunni, O.; Mladenov, D.; Hinduja, S.: Extendible Classification of Design and Manufacturing Features. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51 (2002) 1, S. 103-106.

PACHOW-FRAUENHOFER 2012

Pachow-Frauenhofer, J.: Planung veränderungsfähiger Montagesysteme. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Garbsen: PZH Verlag 2012. ISBN: 978-3-943104-57-8. (Berichte aus dem IFA 01/2012).

PANTFÖRDER ET AL. 2017

Pantförder, D.; Mayer, F.; Diedrich, C.; Göhner, P.; Weyrich, M.; Vogel-Heuser, B.: Agentenbasierte dynamische Rekonfiguration von vernetzten intelligenten Produktionsanlagen. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2. Automatisierung*. 2., erweiterte und bearbeitete Auflage.

Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2017, S. 31-44. ISBN: 978-3-662-53248-5. (Springer Reference Technik).

PATZAK 1982

Patzak, G.: Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1982. ISBN: 978-3-642-81893-6.

PAWELLEK 2014

Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-662-43728-5.

PEREIRA ET AL. 2021

Pereira, J. C.; Moreno, R.; Tenbrock, C.; Herget, A.; Wittich, T.; Hamilton, K.: Advances in Multi-Process Hybrid Production Cells for Rapid Individualised Laser-Based Production. Applied Sciences 11 (2021) 4, S. 1812.

PETRI 1962

Petri, C. A.: Kommunikation mit Automaten. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt (1962).

PHILIPP 2014

Philipp, T.: Messung und Bewertung selbststeuernder Produktionssysteme. Dissertation. Bremer Institut für Produktion und Logistik (BIBA), Universität Bremen (2014).

PILLER 2006

Piller, F. T.: Mass Customization. Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2006. ISBN: 978-3-8350-0355-2.

PRIESE & WIMMEL 2008

Priese, L.; Wimmel, H.: Petri-Netze. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008. ISBN: 978-3-540-76971-2.

RABE ET AL. 2008

Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008. ISBN: 978-3-540-35282-2.

REFA 1991

REFA (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Planung und Steuerung Teil 1. REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1991. ISBN: 9783446163492.

REFA 1997

REFA (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Datenermittlung.
REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. München:
Carl Hanser Verlag 1997. ISBN: 978-3-446-19059-7.

REINHART 2000

Reinhart, G.: Im Denken und Handeln wandeln. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.):
Münchener Kolloquium - ... nur der Wandel bleibt. 16.-17.03.2000. München:
Utz 2000, S. 17-40. ISBN: 389675923X.

REINHART ET AL. 2008

Reinhart, G.; Krebs, P.; Schellmann, H.: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit -
das richtige Maß finden. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium
- Innovationen für die Produktion, Produktionskongress. München, 9.10.2008.
München: Herbert Utz Verlag 2008, S. 45-56.

REINHART ET AL. 2013

Reinhart, G.; Engelhardt, P.; Geiger, F.; Philipp, T. R.; Wahlster, W.; Zühlke,
D.; Schlick, J.; Becker, T.; Löckelt, M.; Pirvu, B.; Stephan, P.; Hodek, S.;
Scholz-Reiter, B.; Thoben, K.; Gorltd, C.; Hribernik, K. A.; Lappe, D.; Veigt,
M.: Cyber-Physische Produktionssysteme. Produktivitäts- und Flexibilitäts-
steigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. wt Werk-
stattstechnik 103 (2013) 2, S. 84-89.

REINHART & ZÄH 2003

Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin, Hei-
delberg: Springer-Verlag 2003. ISBN: 978-3-642-55495-7.

REINHART & ZÜHLKE 2017

Reinhart, G.; Zühlke, D.: Von CIM zu Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.):
Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl
Hanser Verlag 2017, S. XXXI-XL. ISBN: 978-3-446-44989-3.

RIITAHUHTA & PULKKINEN 2001

Riitahuhta, A.; Pulkkinen, A. (Hrsg.): Design for Configuration. A Debate
based on the 5th WDK Workshop on Product Structuring. Berlin: Springer-
Verlag 2001. ISBN: 978-3-642-56905-0.

ROPOHL 2009

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. 3.,
überarbeitete Auflage. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe 2009.
ISBN: 978-3-86644-374-7.

RUDOLF 2007

Rudolf, H.: Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2007. ISBN: 978-3-8316-0697-9. (Forschungsberichte iw 204).

RUDTSCH 2016

Rudtsch, V.: Methodik zur Bewertung von Produktionssystemen in der frühen Entwicklungsphase. Dissertation. Universität Paderborn. Paderborn: Universität Paderborn 2016. ISBN: 978-3942647748. (Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts 355).

RUMPE 2017

Rumpe, B.: Agile Modeling with UML. Code Generation, Testing, Refactoring. Cham: Springer International Publishing 2017. ISBN: 978-3-319-58862-9.

SAATY 1990

Saaty, T. L.: How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research 48 (1990) 1, S. 9-26.

SAATY 2008

Saaty, T. L.: Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences 1 (2008) 1, S. 83-98.

SÁNCHEZ LÓPEZ ET AL. 2011

Sánchez López, T.; Ranasinghe, D. C.; Patkai, B.; McFarlane, D.: Taxonomy, technology and applications of smart objects. Information Systems Frontiers 13 (2011) 2, S. 281-300.

SAUER 2017

Sauer, A.: Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. Aachen: Shaker Verlag 2017. ISBN: 978-3-8440-4997-8. (Forschungsberichte aus dem wbk 195).

SCHENK ET AL. 2014

Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-642-05459-4.

SCHINDLER 2015

Schindler, S.: Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion.

Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2015. ISBN: 978-3-8316-4434-6. (Forschungsberichte iw 294).

SCHLICK ET AL. 2017

Schlick, J.; Stephan, P.; Loskyll, M.; Lappe, D.: Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 2. Automatisierung. 2., erweiterte und bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2017, 3–29. ISBN: 978-3-662-53248-5. (Springer Reference Technik).

SCHMITT ET AL. 2011

Schmitt, R.; Brecher, C.; Corves, B.; Gries, T.; Jeschke, S.; Klocke, F.; Loosen, P.; Michaeli, W.; Müller, R.; Poprawe, R.; Reisgen, U.; Schlick, C. M.; Schuh, G.; Auerbach, T.; Bauhoff, F.; Beckers, M.; Behnen, D.; Brosze, T.; Buchholz, G.; Büscher, C.; Eppelt, U.; Esser, M.; Ewert, D.; Fayzullin, K.; Freudenberg, R.; Fritz, P.; Fuchs, S.; Gloy, Y.-S.; Haag, S.; Hauck, E.; Herfs, W.; Hering, N.; Hüsing, M.; Isermann, M.; Janssen, M.; Kausch, B.; Kempf, T.; Kratz, S.; Kuz, S.; Laass, M.; Lose, J.; Malik, A.; Mayer, M. P.; Molitor, T.; Müller, S.; Odenthal, B.; Pavim, A.; Petring, D.; Potente, T.; Pyschny, N.; Reißmann, A.; Riedel, M.; Runge, S.; Schenuit, H.; Schilberg, D.; Schulz, W.; Schürmeyer, M.; Schüttler, J.; Thombansen, U.; Veselovac, D.; Vette, M.; Wagels, C.; Willms, K.: Selbstoptimierende Produktionssysteme. In: Brecher, C. (Hrsg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2011, S. 747-1057. ISBN: 978-3-642-20693-1.

SCHNEEWEIß 1991

Schneeweiß, C.: Planung 1. Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1991. ISBN: 978-3-540-54000-7.

SCHOLER 2018

Scholer, M.: Wandlungsfähige und angepasste Automation in der Automobilmontage mittels durchgängigem modularem Engineering. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken (2018).

SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007

Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Autonomous Processes in Assembly Systems. CIRP Annals - Manufacturing Technology 56 (2007) 2, S. 712-729.

SCHOLZ-REITER & SOWADE 2010

Scholz-Reiter, B.; Sowade, S.: Der Beitrag der Selbststeuerung zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Berlin: GITO-Verlag 2010, S. 303-322.

ISBN: 978-3-942183-15-4. (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB)).

SCHOLZ-REITER & SOWADE 2011

Scholz-Reiter, B.; Sowade, S.: Wandlungsfähigkeit durch selbststeuernde Produktionssysteme. Ein Beispiel aus der Bekleidungsindustrie. *Industrie Management* 27 (2011) 3, S. 9-12.

SCHUH ET AL. 2012

Schuh, G.; Brandenburg, U.; Cuber, S.: Aufgaben. In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS*. 4., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 29-81. ISBN: 978-3-642-25423-9.

SCHUH ET AL. 2014

Schuh, G.; Schmidt, C.; Hering, N.: Produktionsbedarfsplanung. In: Schuh, G. et al. (Hrsg.): *Produktionsmanagement. Handbuch Produktion und Management* 5. 2., vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014, S. 151-196. ISBN: 978-3-642-54288-6.

SCHUH ET AL. 2017

Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; Hompel, M. ten; Wahlster, W. (Hrsg.): *Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten (acatech STUDIE)*. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. München: Herbert Utz Verlag 2017.

SCHWEIZER 2008

Schweizer, P.: *Systematisch Lösungen finden. Eine Denkschule für Praktiker*. 3., überarbeitete Auflage. Zürich: vdf Hochschulverlag 2008. ISBN: 978-3-7281-3087-7.

SEIFERMANN 2017

Seifermann, S.: *Methode zur angepassten Erhöhung des Automatisierungsgrades hybrider, schlanker Fertigungszellen*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt. Aachen: Shaker Verlag 2017. ISBN: 978-3-8440-5684-6. (Innovation Fertigungstechnik).

SELIG 2011

Selig, A.: *Informationsmodell zur funktionalen Typisierung von Automatisierungsgeräten*. Dissertation. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag 2011. ISBN: 978-3-939890-74-4. (ISW/IPA Forschung und Praxis 180).

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in Manufacturing: A Survey. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990) 4, S. 289-328.

SINGH ET AL. 2017

Singh, A.; Gupta, S.; Asjad, M.; Gupta, P.: Reconfigurable manufacturing systems: journey and the road ahead. International Journal of System Assurance Engineering and Management 8 (2017) 2, S. 1849-1857.

SINNWELL ET AL. 2017

Sinnwell, C.; Fischer, J.; Meissner, H.; Aurich, J. C.: Modellbasierter Referenzentwicklungsprozess für CTPS in frühen Entwicklungsphasen. In: Eigner, M. et al. (Hrsg.): Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme. Der PLM-unterstützte Referenzentwicklungsprozess für Produkte und Produktionssysteme. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2017, S. 103-112. ISBN: 978-3-662-55123-3.

SINNWELL 2020

Sinnwell, C. F.: Methode zur Produktionssystemkonzipierung auf Basis früherer Produktinformationen - Ein Beitrag zur Integration von Produktionssystemplanung und Produktentwicklung unter Einsatz des MBSE. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern 2020. ISBN: 978-3-95974-127-9. (Produktionstechnische Berichte aus dem FBK 02/2020).

SLAMA 2004

Slama, S.: Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestructuren und erweiterte Mitarbeiterkompetenz. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Bamberg: Meisenbach Verlag 2004. ISBN: 978-3-87525-204-7. (Fertigungstechnik - Erlangen 148).

SOLUKON 2021

Solukon: Das Digital Factory Tool steht für Integration. Additive Fertigung - Das Fachmagazin für Rapid Prototyping, -Tooling, -Manufacturing (2021) 2, S. 51.

SPATH 2017

Spath, D.: Grundlagen der Organisationsgestaltung. In: Spath, D. et al. (Hrsg.): Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 3-29. ISBN: 978-3-662-55426-5.

SPUR 2012

Spur, G.: Produktion. In: Czichos, H. et al. (Hrsg.): HÜTTE - Das Ingenieurwissen. 34. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012, L1-L57. ISBN: 978-3-642-22850-6.

STÄHR 2020

Stähr, T. J.: Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme. Dissertation. wbk - Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe (2020).

STANEV 2018

Stanev, S.: Methodik zur produktionsorientierten Produktanalyse für die Wiederverwendung von Produktionssystemen - 2REUSE. Konzept, Informationsmodell und Validierung am besonderen Beispiel des Karosserierohbaus in der Automobilindustrie. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2018. ISBN: 978-3-86644-932-9. (Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe 2 - 2018).

STEHLE & HEISEL 2017

Stehle, T.; Heisel, U.: Konfiguration und Rekonfiguration von Produktionssystemen. In: Spath, D. et al. (Hrsg.): Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 333-367. ISBN: 978-3-662-55426-5.

STEINWASSER 1996

Steinwasser, P.: Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Bamberg: Meisenbach Verlag 1996. ISBN: 3-87525-084-2. (Fertigungstechnik - Erlangen 63).

STRUBE 1996

Strube, G. (Hrsg.): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Stuttgart: Klett-Cotta 1996. ISBN: 3-608-91705-5.

STYR ET AL. 2020

Styr, A.; Schumacher, S.; Bauer, D.; Lucke, D.; Bauernhansl, T.: Description Model for the Assessment of Autonomous Production Stages. Procedia CIRP 93 (2020) 8, S. 353-358.

SUDHOFF 2008

Sudhoff, W.: Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion. Dissertation. Technische Universität München. München: Herbert Utz Verlag 2008. ISBN: 978-3-8316-0749-5. (Forschungsberichte iw 208).

THEISS 2015

Theiss, S.: Echtzeitfähige Softwareagenten zur Realisierung cyber-physischer Produktionssysteme. Dissertation. Technische Universität Dresden (2015).

THEUER 2012

Theuer, H.: Extension of Value Stream Design for the Simulation of Autonomous Production Systems. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual production (CARV 2011), Montreal, Canada, 2-5 October 2011. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2012, S. 586-591. ISBN: 978-3-642-23860-4.

TROMMER 2001

Trommer, G.: Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Shaker Verlag 2001. ISBN: 3-8265-8698-0. (Berichte aus der Produktionstechnik 15/2001).

ULRICH & HILL 1976

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium 5 (1976) 7, S. 304-309.

VASSEUR & DUNKELS 2010

Vasseur, J.-P.; Dunkels, A.: Interconnecting Smart Objects with IP. The Next Internet. Burlington: Morgan Kaufmann Publishers 2010. ISBN: 978-0-12-375165-2.

VDI 2815

VDI 2815, Blatt 5: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung - Betriebsmittel. Berlin: Beuth Verlag 1978.

VDI 2860

VDI 2860: Montage und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth Verlag 1990.

VDI 2225

VDI 2225, Blatt 3: Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung. Berlin: Beuth Verlag 1998.

VDI 2218

VDI 2218: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Feature-Technologie. Berlin: Beuth Verlag 2003.

VDI 2206

VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth Verlag 2004.

VDI 2884

VDI 2884: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). Berlin: Beuth Verlag 2005.

VDI 5200

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

VDI 3405

VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin: Beuth Verlag 2014.

VDI 2803

VDI 2803, Blatt 1: Funktionenanalyse - Grundlagen und Methode. Berlin: Beuth Verlag 2019.

VDI/VDE 2013

VDI/VDE: Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. Thesen und Handlungsfelder. 2013.

VDI/VDE 2653

VDI/VDE 2653, Blatt 1: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik - Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag 2018.

VDMA 2021: Additive Manufacturing: Metall-Pulverbett. Automatisierungs – Roadmap: SMART FACTORY.

<https://www.vdma.org/c/document_library/get_file?uuid=1df764ef-c0fe-9ba8-f142-4b5cf74a41f7&groupId=34570> - 10.07.2022.

VELKOVA 2014

Velkova, J.: Methode zur Selbstbewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. Dissertation. Universität Bochum. Aachen: Shaker Verlag 2014. ISBN: 978-3-8440-2461-6. (Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme 1/2014).

VOGEL-HEUSER ET AL. 2015a

Vogel-Heuser, B.; Schütz, D.; Göhner, P.: Agentenbasierte Kopplung von Produktionsanlagen. Konzept für Cyber-Physische Produktionssysteme. Informatik Spektrum 38 (2015) 3, S. 191-198.

VOGEL-HEUSER ET AL. 2015b

Vogel-Heuser, B.; Lee, J.; Leitão, P.: Agents enabling cyber-physical production systems. *at - Automatisierungstechnik* 63 (2015) 10, S. 777-789.

VOGEL-HEUSER 2017

Vogel-Heuser, B.: Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. In: Vogel-Heuser, B. et al. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4. Allgemeine Grundlagen*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2017, S. 33-44. ISBN: 978-3-662-53254-6. (Springer Reference Technik).

VOIT ET AL. 2020a

Voit, P.; Beller, M.; Reinhart, G.: A methodology for simulation production systems considering the degree of autonomy. In: Nyhuis, P. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 1st Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2020)*. Stellenbosch, 17.-20.03.2020: publish-Ing. 2020, S. 332-341.

VOIT ET AL. 2020b

Voit, P.; Voring, B.; Neuhäuser, T.; Hohmann, A.; Reinhart, G.: Digitale Planung symbiotischer Montagesysteme. Integration elektrifizierter LKW in konventionelle Montagelinien. *wt Werkstattstechnik* 110 (2020) 3, S. 119-124.

VOIT ET AL. 2020c

Voit, P.; Sill, U.; Seidel, C.: Technologieradar für die additive Fertigung. Systematische Identifizierung und Bewertung von Technologien entlang der Prozesskette. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115 (2020) 11, S. 805-809.

VOIT ET AL. 2021

Voit, P.; Jira, M.; Horn, M.; Seidel, C.: Agentenbasierte Simulation für CPPS. Simulationsgestützte Modellierung und Bewertung von modular, skalierbaren Fertigungszellen für Cyber-physische Produktionssysteme (CPPS). *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (2021) 11, S. 841-846.

VOIT ET AL. 2023

Voit, P.; Schnell, L.; Hohmann, A.: A conceptual methodology for the planning of modular and scalable manufacturing cells in the context of Cyber-physical production systems. In: Teti, R. et al. (Hrsg.): *16th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (CIRP ICME 2022)*. Neapel, 13.-15.07.2022: Elsevier Procedia 2023, 276–281. (Procedia CIRP 118).

WAHLSTER 2013

Wahlster, W.: The Semantic Product Memory. In: Wahlster, W. (Hrsg.): Sem-ProM. Foundations of Semantic Product Memories for the Internet of Things. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2013, S. 3-21. ISBN: 978-3-642-37377-0. (Cognitive Technologies).

WANG & KOREN 2012

Wang, W.; Koren, Y.: Scalability planning for reconfigurable manufacturing systems. Journal of Manufacturing Systems 31 (2012) 2, S. 83-91.

WANG & KOREN 2013

Wang, W.; Koren, Y.: Design Principles of Scalable Reconfigurable Manufacturing Systems. In: Bakhtadze, N. et al. (Hrsg.): Proceedings of 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control MIM 2013. Sankt Petersburg, 19.-21.06.2013: IFAC 2013, S. 1411-1416. ISBN: 978-3-902823-35-9. (IFAC Proceedings Volumes).

WEBER 1996

Weber, C.: What is a Feature and What is its Use? In: Roller, D. (Hrsg.): Proceedings of the 29th International Symposium on Automotive Technology and Automation 1996 (ISATA 96). Florenz, 3.-6.06.1996. Croydon: Automotive Automation 1996, S. 109-116.

WEBER 1999

Weber, M.: Vorgabezeitermittlung mit künstlichen neuronalen Netzen für die variantenreiche Kleinserienmontage. Dissertation. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag 1999. ISBN: 978-3-931388-10-2. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 296).

WEGENER 2019

Wegener, D.: Industrie 4.0 – wie die Digitalisierung die Produktionskette revolutioniert. In: Obermaier, R. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation. Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen. Wiesbaden: Springer Gabler 2019, S. 73-89. ISBN: 978-3-658-24576-4.

WESTERMANN 2017

Westermann, T.: Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical Systems des Maschinen- und Anlagenbaus. Dissertation. Universität Paderborn (2017).

WESTKÄMPER 1977

Westkämper, E.: Automatisierung in der Einzel- und Serienfertigung - Ein

Beitrag zur Planung, Entwicklung und Realisierung neuer Fertigungskonzepte. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1977).

WESTKÄMPER ET AL. 2000

Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld. *wt Werkstattstechnik* 90 (2000) 1/2, S. 22-26.

WESTKÄMPER 2003

Westkämper, E.: Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für variantenreiche Serienproduktion. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): *Marktchance Individualisierung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2003, S. 95-108. ISBN: 978-3-642-55495-7.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2006. ISBN: 10 3-540-26039-0.

WESTKÄMPER & ZAHN 2009

Westkämper, E.; Zahn, E.: *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2009. ISBN: 978-3-540-68890-7.

WEYAND 2010

Weyand, L.: *Risikoreduzierte Endmontageplanung am Beispiel der Automobilindustrie*. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken. Saarbrücken: Universität des Saarlandes 2010. ISBN: 978-3-930429-75-2. (Schriftenreihe Produktionstechnik 46).

WIENDAHL 1972

Wiendahl, H.-P.: *Technische Investitionsplanung*. Habilitation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1972).

WIENDAHL 1999

Wiendahl, H.-P.: Grundlagen der Fabrikplanung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): *Produktion und Management 3. Gestaltung von Produktionssystemen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1999, 9-1-9-30. ISBN: 978-3-642-58399-5.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit. Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. *wt Werkstattstechnik* 92 (2002) 4, S. 2-7.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing. Classification, Design and Operation. CIRP Annals - Manufacturing Technology 56 (2007) 2, S. 783-809.

WIENDAHL ET AL. 2014

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2014. ISBN: 978-3-446-43702-9.

WIENDAHL & WIENDAHL 2020

Wiendahl, H.-P.; Wiendahl, H.-H.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 9., vollständig überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag 2020. ISBN: 978-3-446-46061-4.

WINDT 2008

Windt, K.: Ermittlung des angemessenen Selbststeuerungsgrades in der Logistik – Grenzen der Selbststeuerung. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008, S. 349-372. ISBN: 978-3-540-75642-2.

WINDT ET AL. 2010

Windt, K.; Philipp, T.; Böse, F.; Becker, T.: Application of a three-component evaluation system for autonomous control in logistics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 224 (2010) 8, S. 1267-1276.

WINKLER ET AL. 2017

Winkler, H.; Seebacher, G.; Oberegger, B.: Effizienzbewertung und -darstellung in der Produktion im Kontext von Industrie 4.0. In: Obermaier, R. (Hrsg.): Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe. Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen. 2., korrigierte Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler 2017, S. 219-243. ISBN: 978-3-658-16526-0.

WOHLERS ET AL. 2022

Wohlers, T. T.; Campbell, I.; Diegel, O.; Huff, R.; Kowen, J.: Wohlers report 2022. 3D printing and additive manufacturing global state of the industry. Fort Collins: Wohlers Associates 2022. ISBN: 978-0-9913332-9-5.

WONG ET AL. 2002

Wong, C. Y.; McFarlane, D.; Ahmad Zaharudin, A.; Agarwal, V.: The intelligent product driven supply chain. In: El Kamel, A. et al. (Hrsg.): Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2002). Yasmine Hammamet, 6.-9.10.2002. Piscataway: IEEE 2002, S. 6-11.

WYCISK 2009

Wycisk, C.: Flexibilität durch Selbststeuerung in logistischen Systemen. Entwicklung eines realoptionsbasierten Bewertungsmodells. Dissertation. Universität Bremen. Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-8349-1779-9.

ZÄH ET AL. 2005

Zäh, M. F.; Möller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production - The Emperor's New Clothes or Key Factor for Future Success? In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). Garching, 22.-23.09.2005. München: Herbert Utz Verlag 2005, S. 3-10.

ZANGEMEISTER 2014

Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 5., erweiterte Auflage. Winnemark: Zangemeister & Partner 2014. ISBN: 978-3-923264-00-1.

ZBIB ET AL. 2010

Zbib, N.; Railenau, S.; Sallez, Y.; Berger, T.; Trentesaux, D.: From passive products to intelligent products: the augmentation module concept. In: Bernard, A. (Hrsg.): 5th International Conference on Digital Enterprise Technology (DET 2008). Nantes, 22.-24.10.2008: Publibook 2010, S. 243-259. ISBN: 978-2748345988. (Ingénierie virtuelle).

ZEBOLD 2020

Zehbold, C.: Product Lifecycle Management (PLM) im Kontext von Industrie 4.0. In: Fend, L. et al. (Hrsg.): Digitalisierung in Industrie-, Handels- und Dienstleistungsunternehmen. Konzepte - Lösungen - Beispiele. 2., aktualisierte und überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler 2020, S. 79-100. ISBN: 978-3-658-26964-7.

ZIMMERMANN & GUTSCHE 1991

Zimmermann, H.-J.; Gutsche, L.: Multi-Criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1991. ISBN: 978-3-642-58198-4.

ZÜLCH 1996

Zülch, G.: Arbeitswirtschaft. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management Betriebshütte. Teil 2. 7., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1996, 12-94–12-124. ISBN: 978-3-642-87948-7.

Anhang

A1 Intelligenzbezogene Kompatibilitätsmatrix

CPPS-spezifische Anwendung								
z. B. Zustandsdiagnose und -prognose / selbstregelnd, automatisierter Prozessablauf / ...								
System: Basismodul								
Kriterien		Ausprägungen						
Automatisierungsleistungsstufe (AL)		Nicht automatisiert (NA)		Assistiert automatisiert (AA)	Automatisiert (AU)			
CPPS-Leistungsstufe (CPPS-L)		Keine CPPS-Einbindung (KC)	Datenbereitstellung (DB)	Datenanalyse (DA)	Dateninterpretation (DI)	Selbstkonfiguration (SK)		
Steuerungs- und Kommunikationseinrichtung (SuK)	Art der Steuerungsstruktur (SS)	Zentral (Z)		Kombiniert (K)	Dezentral (D)			
	Ort der Informationsverarb. (IV)	Zentral (Z)		Kombiniert (K)	Dezentral (D)			
	Ort der Datenhaltung (DH)	Zentral (Z)		Kombiniert (K)	Dezentral (D)			
Objekt: Betriebsmittel / Produkt								
Kriterien		Ausprägungen						
Automatisierungsstufe (AS)		Nicht automatisiert (NA)		Grundlegend automatisiert (GA)	Erweitert automatisiert (EA)	Hoch- / vollautomatisiert (H/VA)		
Intelligente Funktion (IF)		Identifikationsfähigkeit (ID)	Lokalisierbarkeit (LO)	Speicherfähigkeit. Objektinfo (OI)	Monitoring (MO)	Kommunikationsfähigkeit. (KO)	Informationsableitung (IA)	Selbst. Entscheidungs-f. (SE)
Informations- und Kommunikationstechnologie (IuK)	Identifikator (Id)		Kein (KE)		Passiv (PA)	Aktiv (AK)		
	Kommunikations-schnitt-stelle (Ks)	Nutzer (N)	Keine (KE)		Nutzerrückmeldung (NR)	Nutzerinteraktion (NI)		
		Komm.-Syst. (KS)	Keine (KE)		Datenübertragung (DÜ)	Systeminteraktion (SI)		
	Informationsspeicherung (Is)		Keine (KE)		Ausgelagert (AG)	Eingebettet (EG)		
	Informationsverarbeitung (Iv)		Keine (KE)		Ausgelagert (AG)	Eingebettet (EG)		
	Sensorik (Se)		Keine (KE)		Zustandserfassung (ZE)	Umwelterfassung (UE)		
	Aktorik (Ak)		Keine (KE)		Funktionsausführung (FA)	Umweltmanipulation (UM)		
	Energieversorgung (Ev)		Keine (KE)		Ausgelagert (AG)	Eingebettet (EG)		

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) sowie am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) in den Jahren von 2019 bis 2021 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen Arbeiten wurden verschiedene Fragestellungen zur Gestaltung modularer, skalierbarer Fertigungszellen im Kontext Cyber-physischer Produktionssysteme untersucht, wobei deren Ergebnisse teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

- | | |
|------------------|--|
| Beller, M. | Modellierung und Simulation eines autonomen Produktionssystems am Beispiel der variantenreichen additiven Fertigung (August, 2019), eingeflossen in Abschnitt 6.3.3 und Abschnitt 7.2.2.3 |
| Dehio, G. | Methode zur systematischen Identifizierung und Charakterisierung von Betriebsmitteln für die autonome Produktion (August, 2020), eingeflossen in Abschnitt 5.1.3.2 |
| Feuchtgruber, L. | Methode zur fähigkeitsbasierten Planung von modularen additiven Produktionssystemen unter Berücksichtigung des Autonomiegrads (November, 2019), eingeflossen in Abschnitt 5.1, Abschnitt 6.2 und Abschnitt 6.3 |
| Kelm, B. | Methode zur Bestimmung der Rahmenbedingungen und Bedarfe für autonome Prozesse in der kundenindividuellen Produktion (April, 2021), eingeflossen in Abschnitt 5.2 |
| Jira, M. | Agentenbasierte Simulation zur Bewertung von cyber-physischen Produktionssystemen mit unterschiedlichen Fertigungszellkonfigurationen (Juni, 2021), eingeflossen in Abschnitt 6.3.3 und Abschnitt 7.2 |
| Maier, M. | Bedarfsanalyse autonomer Prozesse für die kundenindividuelle Produktion - Entwicklung einer fähigkeitsbasierten Methode am Beispiel der additiven Fertigung (Februar, 2020), eingeflossen in Abschnitt 5.2 |

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

- Rösel, J. Entwicklung einer Methode zur Bewertung von modularen Produktionssystemen unter Berücksichtigung des Autonomiegrades (November, 2020), eingeflossen in Abschnitt 6.4
- Schnell, L. Methodik zur Planung modularer, rekonfigurierbarer Fertigungszellen für Cyber-physische Produktionssysteme (August, 2021), eingeflossen in Abschnitt 5.1, Abschnitt 5.2, Abschnitt 6.1, Abschnitt 6.2 und Abschnitt 6.3
- Zipse, A. K. Methode zur fähigkeitsbasierten Planung von modularen Produktionssystemen unter Berücksichtigung des Autonomiegrades (Juni, 2020), eingeflossen in Abschnitt 5.2