

Dipl.-Ing. Fabian Bertelsmeier

Produkttolerante Automation zellenbasierter Fertigungssysteme

Product-tolerant automation of cell-based manufacturing systems

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Als elektronische Version frei verfügbar über die Digitalen Sammlungen der Universitätsbibliothek Paderborn.

Satz und Gestaltung: Dipl.-Ing. Fabian Bertelsmeier

Produkttolerante Automation zellenbasierter Fertigungssysteme

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Fabian Bertelsmeier
aus Paderborn
im März 2020

Tag des Kolloquiums: 13. März 2020
Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Regelungstechnik am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in Paderborn.

Dem Direktor des Fraunhofer IEM sowie Inhaber des Lehrstuhls Regelungstechnik und Mechatronik (RtM) am Heinz-Nixdorf-Institut der Universität Paderborn Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler danke ich recht herzlich für seine Anregungen und den Rückhalt während der Promotion. Stets zur Diskussion bereit, schuf er ein sehr angenehmes Arbeitsklima.

Zu Dank verpflichtet bin ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu für die freundliche Übernahme des Korreferats und die konstruktiven Hinweise.

Mein herzlicher Dank richtet sich an meine Kolleginnen und Kollegen vom Fraunhofer IEM für die zahlreichen anregenden Diskussionen und für die kritische Durchsicht dieser Arbeit.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Studenten, insbesondere Herrn Jan Frederik Pollmann, die mit ihren Bachelor-, Studien, Projekt- und Masterarbeiten sowie ihrer Tätigkeit als studentische Hilfskraft zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Svenja, meiner Tochter Jule, meinem Sohn Henry und meinen Eltern, denen ich diese Arbeit widme. Sie haben mich über die gesamte Dauer meines Studiums und meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter stets verständnisvoll unterstützt und mir den Freiraum zur Erstellung dieser Dissertation geschaffen.

Schlangen, im März 2020

Fabian Bertelsmeier

Vorveröffentlichungen

- [BPT16] BERTELSMEIER, F.; POLLMANN, J.; TRÄCHTLER, A.: *A HRRN based scheduling for FMS and RMS with networked control and product-intelligence*. Proceedings of 2016 IEEE 42th IECON, Florence, Italy, 24. Oct. - 27. Oct. 2016
- [BST16] BERTELSMEIER, F.; SCHÖNE, S.; TRÄCHTLER, A.: *Development and design of intelligent product carriers for flexible networked control of distributed manufacturing processes*. Proceedings of 2016 IEEE 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Athens, Greece, 21. Juni. - 24. Juni. 2016
- [GHB⁺16] GENEISS, V.; HEDAYAT, C.; BERTELSMEIER, F.; HENKE, C.; VATHAUER, K.-E.; GESSNER, T.: *Product Data and Sensor-based Intelligent Drive Control for Flexible Manufacturing and Intralogistic Processes*. Proceedings of Smart Systems Integration 2016 International Conference and Exhibition on integration of materials, devices and Systems, Munich, Germany
- [BT15] BERTELSMEIER, F.; TRÄCHTLER, A.: *Decentralized Controller Reconfiguration Strategies for Hybrid System Dynamics based on Product-Intelligence*. Proceedings of 2015 IEEE 20th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Luxembourg, Luxembourg, 8. Sept. - 11. Sept. 2015
- [BVH⁺15] BERTELSMEIER, F.; VATHAUER, M., HENKE, C., VATHAUER, K.-E., TRÄCHTLER, A.: *Produkt- und lastabhängiges dezentrales Motormanagement für die Fördertechnik*. Tagungsband AUTOMATION 2015, AUTOMATION 2015, Baden-Baden, Germany, 11. Juni - 12. Juni 2015
- [BET15] BERTELSMEIER, F.; ENGELMEIER, T., TRÄCHTLER, A.: *Online-Rekonfiguration hybrider Regelkreise in Abhängigkeit variierender Produkteigenschaften*. Tagungsband Mechatronik 2015, Fachtagung Mechatronik 2015, Dortmund, Germany, 12. März - 13. März 2015, S. 97-102

Zusammenfassung

Aktuelle Trends in der Fertigungstechnik zeigen eine steigende Individualisierung von Produkten mit hoher Variantenvielfalt. Daraus resultieren sinkende Losgrößen, steigende Auftragszahlen und der zunehmende Bedarf an Daten- und Informationsverarbeitung. Zur Handhabung dieser Komplexität werden modulare, oftmals in Zellen organisierte, flexible und rekonfigurierbare Fertigungssysteme benötigt. Vorteilhaft hierfür sind intelligente Produkte mit skalierbaren Fähigkeiten, die neben ihrer Präsenz als Werkstück zudem als aktives Element innerhalb der Steuerung und Planung des eigenen Fertigungsprozesses integriert sind. Diese Arbeit fokussiert eine anwendungsspezifische Symbiose der Produktintelligenz, der Flexibilität und der Autonomie, welche auf Basis der Topologie von flexiblen zellenbasierten Fertigungssystemen zu einer produkttoleranten Automation führt. Darauf aufbauend erfolgt erstmals die Entwicklung und Validierung einer produkttoleranten Steuer- und Regelung und die Spezifikation einer Strategie zur informationstechnischen Integration der Produktintelligenz in die dezentrale Automatisierung. Neben der gestiegenen dezentralen produkttoleranten Autonomie spielt die flexible Planung der zellenbasierten Fertigung bei kleinen Losgrößen und hoher Variantenvielfalt zusätzlich eine entscheidende Rolle. Basierend auf dem Highest Response Ratio Next Schedulingverfahren für Prozessoren, wird ein neuartiges zweistufiges flexibles Planungsverfahren für zellenbasierte Fertigungssysteme entwickelt. Abschließend erfolgt eine ganzheitliche produkttolerante Konzeptionierung einer hochflexiblen Kerzenfertigung, deren Systemverhalten partiell in einem realen Prüfstand zur Wachsabfüllung untersucht wird. Zudem werden Simulationsstudien zur Analyse und Validierung der dynamischen Fertigungsplanung des neu entwickelten Schedulingverfahrens und drei weiteren Planungsmethoden durchgeführt.

Abstract

Current trends in manufacturing technology show increasing individualization of products with a large variety of variants. This results in smaller lot sizes, increasing order numbers and rising data and information processing for manufacturing companies. To deal with this challenge, cell-based flexible and reconfigurable manufacturing systems are necessary. Even more advantageous for this are intelligent products with scalable capabilities which are, in addition to their presence as a workpiece or semi-finished product, active elements within the control and planning of their own production process. This thesis focuses on an application-specific symbiosis of product intelligence, flexibility and autonomy, which is based on the topology of flexible cell-based manufacturing systems and directly leads to a product-tolerant automation. First, the development and validation of a product-tolerant control and the specification of a strategy for the integration of product intelligence into the distributed automation is implemented. In addition to the increased decentralized product-tolerant autonomy, the flexible planning of cell-based production also plays a decisive role for the manufacturing of small batch sizes and a high variety of variants. Based on the highest response ratio next scheduler, a novel, two-stage, flexible planning concept for cell-based manufacturing systems is developed. Finally, a holistic product-tolerant conceptualization of a highly flexible candle manufacturing is shown. The partial system behavior pertaining to filling of candle wax is examined in a real test rig. In addition, simulation studies are carried out for the analysis and validation of the dynamic production planning of the newly developed scheduling process and three further planning methods.

Produkttolerante Automation zellenbasierter Fertigungssysteme

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung	2
1.2	Aufbau und Abgrenzung der Arbeit	4
2	Topologie flexibler Fertigungssysteme	7
2.1	Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Wandelbarkeit	7
2.1.1	Hierarchie flexibler Fertigungssysteme	7
2.1.2	Klassifizierung von Flexibilität, Rekonfigurier- und Wandelbarkeit	9
2.1.3	Resümee zur Hierarchisierung und Klassifizierung	12
2.2	Automation von flexiblen Fertigungssystemen	13
2.2.1	Organisationsstrukturen von flexiblen Fertigungssystemen	13
2.2.2	Steuerung und Regelung von flexiblen Fertigungssystemen	17
2.3	Fazit und Zusammenfassung	19
3	Produktintelligenz in der flexiblen Fertigungsautomation	21
3.1	Schlüsseltechnologien für die Produktidentifikation	21
3.2	Definition der Produktintelligenz	22
3.2.1	Definition nach McFARLANE et al.	22
3.2.2	Definition nach KÄRKKÄINEN et al.	23
3.2.3	Definition nach VENTÄ	23
3.2.4	Resümee der Definitionen von Produktintelligenz	24
3.3	Klassifizierung von intelligenten Produkten	24
3.4	Informations- und Datenstrukturen intelligenter Produkte	27
3.5	Fazit und Zusammenfassung	30
4	Produktgesteuerte flexible Fertigungsautomation	31
4.1	Stand der Wissenschaft und Technik	31
4.2	Fazit und Abgrenzung zum Stand der Wissenschaft und Technik	34
4.3	System- und Zellentopologie produktgesteuerter flexibler Fertigungsprozesse	37
4.4	Produktbedürfnis- und Produkttoleranz	40
4.4.1	Begriffsdefinitionen	40
4.4.2	Anforderungen an ein produkttolerantes System	41
4.5	Zielsetzung der Arbeit	44
4.6	Fazit und Zusammenfassung	45

5	Steuerung und Regelung für produkttolerante Teilsysteme eines zellenbasierten Fertigungsprozesses	47
5.1	Steuerung und Regelung hybrider dynamischer Systeme	47
5.1.1	Eigenschaften von hybriden dynamischen Systemen	47
5.1.2	Beschreibungsformen von hybriden dynamischen Systemen	50
5.2	Produkttolerante Steuer- und Regelung	52
5.2.1	Aufbau und Funktion der produkttoleranten Steuer- und Regelung	52
5.2.2	Produktgetriggerte Kommunikation, Rekonfiguration und Interaktion	55
5.3	Entwurfsleitfaden einer produkttoleranten Steuer- und Regelung	62
5.4	Produkttolerante Steuer- und Regelung am Beispiel eines Szenarios für die zellenbasierte Fertigung	69
5.5	Produkttolerante Steuerung und Regelung am Beispiel eines Handlingsystems	76
5.6	Fazit und Zusammenfassung	80
6	Dynamische Prozessplanung für produkttolerante und vernetzte Fertigungssysteme	83
6.1	Grundlagen der dynamischen Ablaufplanung	83
6.2	Strategien für die dynamische Ablaufplanung	85
6.3	Stand der Wissenschaft und Technik	89
6.4	Anforderungen an eine dynamische Prozessplanung für produkttolerante und vernetzte Fertigungssysteme	91
6.5	Zwischenfazit und Abgrenzung zum Stand der Wissenschaft und Technik	92
6.6	Entwicklung des erweiterten HRRN-basierten Planungsverfahrens	95
6.6.1	Entwicklung des globalen Planungsverfahrens	95
6.6.2	Entwicklung des zellinternen Planungsverfahrens	96
6.7	Simulationsumgebung unter MATLAB	98
6.8	Funktionsanalyse des erweiterten HRRN Verfahrens	100
6.9	Fazit und Zusammenfassung	104
7	Produkttolerante Kerzenfertigung	105
7.1	Konzept und Aufbau des zellenbasierten produkttoleranten Kerzenfertigungsprozesses	106
7.2	Aufbau und Funktion der Wachsabfüllmaschine	110
7.3	Aufbau und Funktion des intelligenten Kerzenträgers	114
7.4	Fazit und Zusammenfassung	116
8	Applikation und Validierung in der produkttoleranten Kerzenfertigung	117
8.1	Applikation und Analyse der produkttoleranten Steuerungs- und Regelungsstruktur am Beispiel der Wachsabfüllmaschine	117
8.2	Analyse der dynamischen Prozessplanung für die produkttolerante Kerzenfertigung	123
8.2.1	Parametrisierung der Simulationsumgebung	123
8.2.2	Dynamische Fertigungsplanung bei minimaler Produktvarianz	128
8.2.3	Dynamische Fertigungsplanung bei maximaler Produktvarianz	137
8.2.4	Fazit zur Simulationsstudie	144

9 Zusammenfassung und Ausblick	147
Literatur	149

Anhang

A1 Datenblätter	163
A1.1 Getriebegleichstrommotor 1/2	163
A1.2 Getriebegleichstrommotor 2/2	164
A1.3 Gleichstromantriebsmotor	165
A1.4 RFH 630 RFID Lese- und Schreibgerät	166
A1.5 EDP Mini Handlingsystem	167
A1.6 EDP Mini Handlingsystem - z-Linearachse	168
A1.7 EDP Mini Handlingsystem - y-Linearachse	169
A1.8 Abfüllventile (1/2)	170
A1.9 Abfüllventile (2/2)	171

Abkürzungsverzeichnis

CPPS	Cyberphysisches Produktionssystem
CPS	Cyberphysisches System
DB	Datenbank
DPS	Datenbank-Prozess Schnittstelle
DR	Drehzahlregelung
DSM	Daten- und Schnittstellenmodell
EAT	Earliest Arrival Time
EDD	Earliest Due Date
EDF	Earliest Deadline First
extHRRN	Extended Highest Response Ratio Next
EZM	Erweitertes Zustandsraummodell
FCFS	First Come First Served
FMS	Flexible Manufacturing System
FZ	Fertigungszelle
GS	Globaler Scheduler
GW	Globale Warteschlange
HA	Hybrider Automat
HDS	Hybrides dynamisches System
HPN	Hybrides PETRI-Netz
HR	Hybride Regelung
HRG	Hybrider Referenzgenerator
HRRN	Highest Response Ratio Next
HS	Hybride Strecke
IKT	Intelligenter Kerzenträger
LCFS	Last Come First Served
LDF	Latest Deadline First
LED	Light-emitting Diode
LF	Leerlauf
LPN	Longest Process Next
LW	Lokale Warteschlange
LWKR	Least Work Remaining
MLD	Mixed Logical Dynamical System
MLPD	Multi-Level Priority Discipline
MWKR	Most Work Remaining

NFC	Near-field Communication
NZM	Netz-Zustands-Modell
OCR	Optical Character Recognition
OPC	Open Platform Communications
OPC-UA	Open Platform Communications Unified Architecture
OR	Online-Rekonfiguration
OS	Organisationsstruktur
PD	Proportional-Differential Regler
PDS	Produkt-Datenbank Schnittstelle
PI	Proportional-Integral Regler
PID	Proportional-Integral-Differential Regler
PINT	Produktintelligenz
PPS	Produkt-Prozess Schnittstelle
PR	Positionsregelung
Prio-NP	Non-Preemptive Priority Discipline
Prio-P	Preemptive Priority Discipline
PTR	Produkttoleranter Rekonfigurator
PWM	Pulsweitenmodulation
RFID	Radio Frequency Identification
RMS	Reconfigurable Manufacturing System
RR	Round Robin
rtHRRN	Retool Highest Response Ratio Next
SAS	Stückweise affines System
SIPN	Steuerungstechnisch interpretiertes PETRI-Netz
SIRO	Service in Random Order
SPN	Shortest Process Next
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SR	Stromregelung
SRT	Shortest Remaining Time
TLS	Time Scheduling
TN	Teilnehmer
UML	Unified Modeling Language
VS	Vorsteuerung
WT	Werkstückträger
ZS	Zell-Scheduler

Symbolverzeichnis

Name	Beschreibung	Einheit
A_{PT}	Anforderung an ein produkttolerantes System	–
D	Ereignisdiskreter Systemanteil	–
H	Absolute Häufigkeit	–
I	Injektor	–
K	Kontinuierlicher Systemanteil	–
L_B	Losgröße einer Bestellung	–
N_{KE}	Kerzenanzahl	–
N_{RT}	Werkzeugwechselanzahl	–
P_v	Intelligentes Produkt	–
Q	Quantisierer	–
R	Regel- bzw. Steuerung	–
W_G	Globale Warteschlange	–
$W_{\Sigma n}$	Zellinterne Warteschlange	–
ΔP_v	Produktvarianz	–
Γ_{gs}	Antwortquotient des globalen Planungsverfahrens	–
Γ_{zs}	Antwortquotient des zellinternen Planungsverfahrens	–
Λ_s	Auswahlfunktion des Planungsverfahrens	–
Σ_n	Fertigungszelle	–
$\Sigma_{n,j}$	Maschine	–
Σ	Regel- bzw. Steuerstrecke	–
α	Beschleunigungsmaß	%
δ_{RG}	Steuerungssignal des hybriden Referenzgenerators	–
δ_R	Steuerungssignal der hybriden Regelung	–
λ_B	Bestellrate	1/s
$\bar{\tau}_a$	Mittlere Antwortzeit einer Produktsequenz	s
σ_a	Standardabweichung der Antwortzeiten	s
τ_Σ	Bearbeitungsdauer	s
τ_a	Antwortzeit eines Produktes	s
τ_{dbr}	Datenbanklesezugriff	s
τ_{dbw}	Datenbankschreibzugriff	s
τ_{dp}	Datenverarbeitung	s
τ_{pk}	Online-Produktkommunikationsdauer	s
τ_{pr}	Produktlesezugriff	s
τ_{pw}	Produktschreibzugriff	s
τ_q	Wartezeit eines Produktes in der Warteschlange	s
τ_{rco}	Online-Rekonfigurationsdauer	s
τ_{rc}	Rekonfigurationsdauer	s
τ_{rt}	Werkzeugwechselzeit	s
τ_r	Zeitreserve zum Fertigstellungszeitpunkt	s
τ_v	Verspätung zum Fertigstellungszeitpunkt	s
p_{vR}	Direkte Produktparameter	–

Name	Beschreibung	Einheit
$p_{v\Sigma}$	Indirekte Produktparameter	—
t_0	Ankunftszeit eines Produktes in der Warteschlange	s
t_1	Startzeitpunkt der Bearbeitung eines Produktes	s
t_2	Istzeitpunkt für fertiggestelltes Produkt	s
t_Σ	Transitionen der hybriden Strecke	—
t_R	Transitionen des hybriden Reglers	—
t_{bp}	Beginn einer Produktinstanz	s
t_d	Sollzeitpunkt für fertiggestelltes Produkt	s
t_{ep}	Ende einer Produktinstanz	s
t_r	Anstiegszeit	s
$t_{i,j}^{a,b}$	Transitionen der Rekonfigurationsstrategie	—
t	Zeit	s
u_I	Kontinuierliche Kopppeinganggröße	—
u	Kontinuierliche Eingangsgröße	—
v_Q	Ereignisdiskrete Kopppeinganggröße	—
v	Ereignisdiskrete Eingangsgröße	—
w	Ereignisdiskrete Ausgangsgröße	—
x	Kontinuierliche Zustandsgröße	—
y	Kontinuierliche Ausgangsgröße	—
z_Σ	Ereignisdiskrete Zustandsgröße der hybriden Strecke	—
z_R	Ereignisdiskrete Zustandsgröße des hybriden Reglers	—
$z_i^{a,b}$	Zustände der Rekonfigurationsstrategie	—
z	Ereignisdiskrete Zustandsgröße	—

1 Einleitung

Mit dem Beginn der ersten industriellen Revolution um 1750, welche durch die Erfindung von Arbeits- und Kraftmaschinen ermöglicht wurde, entstanden die ersten teilmechanisierten Fabrikssysteme in der Textil-, Eisen- sowie Stahlindustrie [Bau14]. Zwischen 1850 und 1870 erfolgte die zweite industrielle Revolution durch arbeitsteilige Massenproduktion mithilfe elektrischer Energie insbesondere in der Elektro-, Chemie und Automobilindustrie (siehe Bild 1-1). Durch die Einführung des T-Modells setzte HENRY FORD im Jahr 1913 neue Maßstäbe in der Massenproduktion infolge der Fließbandfertigung [Bau14]. Im Jahre 1955 befindet sich die Massenfertigung z.B. für das Volksauto VW Käfer auf dem Zenit. Die dritte industrielle Revolution um 1960 ermöglichte die automatisierungsgetriebene Rationalisierung sowie variantenreiche Serienproduktion durch Integration von Elektronik und Informationstechnologie in die Fertigungsautomation [Bau14]. Ab diesem Zeitpunkt begann zunehmend eine kundenindividuelle Massenproduktion, wodurch das Volumen pro Variante ab- und die Produktvielfalt zunahm. Um das Jahr 2000, nach Fall des eisernen Vorhangs, konnte die Globalisierung ungehindert fortschreiten. Dies führte zu heterogenen Produkten infolge der zunehmenden Regionalisierung und Personalisierung [Bau14].

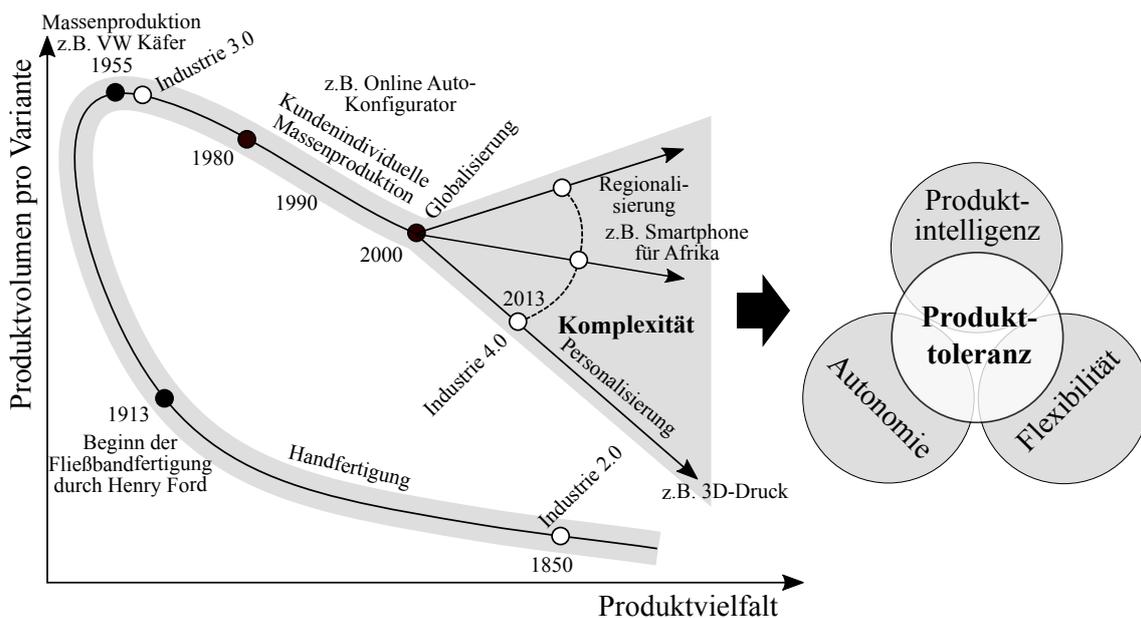


Bild 1-1: Geschichtliche Entwicklung der Fertigung (in Anlehnung an [Bau14, S.13])

Zur Bewältigung der zunehmend steigenden Produktkomplexität wurde zwischen den Jahren 2011 und 2013 die vierte industrielle Revolution zunächst als Zukunftsprojekt im Rahmen der deutschen Hightech-Strategie und anschließend durch die Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 von KAGERMANN et al. offiziell eingeleitet [KWH13]. Im Kontext von Industrie 4.0 ist häufig die Rede von cyberphysischen Systemen (*engl. cyber-physical systems, CPS*) [BK13; GB12; VDB13]. Ein CPS ist nach BETTENHAUSEN [BK13] und in ähnlicher Form von KAGERMANN [KWH13] folgendermaßen erläutert:

„*Cyber-Physical Systems (CPS) sind gekennzeichnet durch eine Verknüpfung von realen (physischen) Objekten und Prozessen mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze*“ [BK13, S.2].

Die Kopplung von informationsverarbeitenden Komponenten und Prozessen sowie deren stetig steigende Vernetzung ist in der Automatisierungstechnik seit vielen Jahrzehnten Stand der Technik und ermöglicht eine allgegenwärtige Verfügbarkeit von Daten und Diensten [BK13]. Daraus ergibt sich die Vision von cyberphysischen Produktionssystemen (CPPS) (*engl. cyber-physical production systems*) [BK13; KWH13; LS13], welche sich durch adaptive, selbst rekonfigurierende und hochflexible Fähigkeiten auszeichnen [BK13].

Wesentliche technologische Säulen eines CPPS sind zum einen die **Autonomie**, welche eine sukzessive Ablösung der klassischen zentralisierten Automatisierungshierarchien durch vernetzte, dezentrale und zum Teil selbstorganisierende Systeme in der Fertigung beschreibt [BK13; KWH13; BGH⁺13; BAD⁺15; VKBW09; Mon15]. Zum anderen müssen infolge der gestiegenen Produktvielfalt und Modularität die Fertigungssysteme durch die **Flexibilität** befähigt werden, sich unterschiedlichsten Produktionsbedingungen und variierenden Losgrößen anzupassen [BK13; VDB13; Mon15]. Des Weiteren findet eine zunehmende Integration der Produkte als intelligentes Steuerungselement im eigenen Fertigungsprozess statt [BK13; Ost12]. Die **Produktintelligenz** beschreibt im Wesentlichen die Fähigkeiten des Produktes und dessen informationstechnische Integration innerhalb der Fertigungsautomation [MGWH13; Ost12; MFH09; BK13].

Aus einer geeigneten anwendungsspezifischen Symbiose von Autonomie, Flexibilität und Produktintelligenz ergibt sich die **Produkttoleranz** eines Fertigungssystems, wie in Bild 1-1 angedeutet, deren Erläuterung und Definition detailliert in Kapitel 4 beschrieben wird.

1.1 Motivation und Zielsetzung

Aktuelle Trends aus der Produktionstechnik sowie dem Anlagen- und Maschinenbau zeigen, dass gerade bei kleinen und mittelständischen Unternehmen eine zunehmende kundenspezifische Individualisierung von Produkten mit hoher Variantenvielfalt zu beobachten ist [BK13; Ost12]. Für die auftragsbezogene Fertigung von Produkten führt dies zu sinkenden Losgrößen, zunehmenden Auftragszahlen und somit zu einer steigenden Daten- und Informationsverarbeitung innerhalb der Prozessautomatisierung und der Auftragsverwaltung im Unternehmen [Ost12; GC13]. Zur Bewältigung dieser Herausforderung sind **produkttolerante** Fertigungssysteme erforderlich, dessen Basis im Folgenden spezifiziert wird.

Ein flexibles Fertigungssystem (*engl. flexible manufacturing system, FMS*) bestehend, aus mehreren Fertigungszellen (FZ) mit internen Maschinen, besitzt die Fähigkeiten innerhalb vordefinierter Bereiche ohne physikalische Änderungen eine Anpassung des Fertigungsprozesses und des Produktionsvolumens vorzunehmen [EW09]. Im Gegensatz dazu ermöglicht ein rekonfigurierbares Fertigungssystem (*engl. reconfigurable manufacturing system, RMS*) eine skalierbare Kapazität und veränderbare Funktionalität durch physikalische Änderung der Komponenten [EW09]. Hierbei können wesentliche Systembestandteile wie bspw.

Fertigungszellen, Maschinen, Maschinenmodule sowie Materialtransportsysteme entfernt, hinzugefügt und/oder modifiziert werden [EW09]. Zur Steuerung und Regelung der FZ sowie deren Maschinen sind aufgrund der benötigten geringen Reaktionszeit und der geforderten Autonomie vernetzte dezentrale Systemkomponenten erforderlich [VDB13; Lun14; Mon15], welche die fertigungsrelevanten und zum Teil produktspezifischen Anpassungen und Änderungen eines FMS bzw. RMS ermöglichen [Ost12; EW09]. Die Integration von intelligenten Produkten innerhalb eines Fertigungsprozesses bspw. über Barcode oder Funketiketten ist bereits seit vielen Jahren Stand der Technik [MGWH13; Ost12; MFH09; BK13]. Allerdings dienen sie in den meisten Fällen nur zur Übermittlung einer eindeutigen Identifikationsnummer, wodurch der oftmals zentralen Fertigungssteuerung ermöglicht wurde, aus einer Datenbank produktspezifische Informationen abzurufen [Ost12; Irr14]. Darauf basierend wurden Maßnahmen für den Fertigungsprozess abgeleitet [Ost12; Irr14]. Bei der Realisierung eines FMS bzw. RMS als CPPS, werden die Produkte selbst durch ihre Intelligenz befähigt, ein aktives Element in der Steuerung des eigenen Fertigungsprozesses zu werden [Ost12; MFH09; MGWH13]. Derzeit erfolgt innerhalb der verteilten und dezentral vernetzten Steuer- sowie Regelungsstruktur der Maschinen als Bestandteil einer FZ keine systematische und spezifizierte Integration von intelligenten Produkten. Zudem sind derzeit keine Strategien oder Regularien bekannt, welche in Abhängigkeit der Produktfähigkeiten die Kommunikation und Interaktion zwischen Maschine und intelligentem Produkt koordinieren. Auf Basis der übermittelten produktspezifischen Daten muss zudem eine zuverlässige Rekonfiguration der Steuer- und Regelung gewährleistet werden, damit die gewünschte Maschinendynamik entsprechend der Produkthanforderungen adaptiert werden kann. Neben der Dynamik einer Fertigungsmaschine muss die hohe kundenindividuelle Variantenvielfalt eines Produktes und die Auftragspriorität bei kleinen Losgrößen ebenfalls in einer dynamischen Planung der zellenbasierten Fertigung berücksichtigt werden.

Zusammenfassend werden die **wesentlichen Ziele** dieser Arbeit wie folgt definiert, deren Herleitung detailliert in Kapitel 4 erfolgt:

- Vernetzte steuerungs- und regelungstechnische Integration von intelligenten Produkten innerhalb der dezentralen Systemkomponenten eines flexiblen und modular aufgebauten zellenbasierten Fertigungsprozesses unter Berücksichtigung der gestiegenen Produktvarianz.
- Spezifikation einer Strategie für die flexible produktabhängige Rekonfiguration und Interaktion zwischen den vernetzten Steuerungs- und Regelungsstrukturen und intelligenten Produkten in Abhängigkeit des Intelligenzgrades und der Produktvarianz.
- Entwicklung einer dynamischen Produktionsplanung für zellenbasierte Fertigungstopologien unter Berücksichtigung der Produktintelligenz, variierender Produkteigenschaften und den Produktbedürfnissen. Zudem sollten schwankende Losgrößen bis hin zur Ein-Stück-Fertigung, produktindividuelle Prioritäten, unbekannte Bestellzeitpunkte und die flexiblen Zelleneigenschaften berücksichtigt werden.

Die technologischen Lösungsansätze zur Erfüllung der Ziele dienen als Erweiterung zu dem in den Kapiteln 4, 5 und 6 beschriebenen Stand der Wissenschaft und Technik.

1.2 Aufbau und Abgrenzung der Arbeit

Der benötigte Stand der Wissenschaft und Technik zur Abgrenzung dieser Arbeit erstreckt sich themenabhängig über die Kapitel 2, 3, 4, 5 und 6. Im Folgenden wird die Struktur der Arbeit aufgezeigt und die **wesentlichen Neuerungen**, welche im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, im Vergleich zum Stand der Wissenschaft und Technik vorgestellt.

Kapitel 2 vermittelt zunächst einen Überblick über die Hierarchisierung von flexiblen Fertigungssystemen. Im Anschluss erfolgt eine systematische Klassifizierung der Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Merkmale. Abschließend werden Organisationsstrukturen, sowie Topologien für die Steuerung und Regelung von flexiblen Produktionsanlagen diskutiert und verglichen.

Kapitel 3 zeigt Schlüsseltechnologien für die Produktidentifikation und vergleicht verschiedene Definitionen der Produktintelligenz (PINT). Des Weiteren erfolgt eine systematische dreidimensionale Klassifizierung der PINT hinsichtlich Fähigkeiten, Entscheidungslokalität sowie Intelligenzträger. Zudem wird ein **neuartiges Daten- und Schnittstellenmodell entwickelt**, welches zur anwendungsspezifischen und informationstechnischen Integration der Produktintelligenz dient.

Kapitel 4 diskutiert den Stand der Wissenschaft und Technik der produktgesteuerten flexiblen Fertigungsautomation. Darauf aufbauend werden die Ziele dieser Arbeit und die Topologie der zellenbasierten Fertigung erläutert. Zudem erfolgt, die in dieser Arbeit entstandene Definition der Begriffe **Produktbedürfnis** und **Produkttoleranz**. Abschließend werden erstmalig die **Anforderungen** für die **Entwicklung** eines **produkttoleranten Systems** definiert.

Kapitel 5 vermittelt zunächst die Grundlagen zur Beschreibung von hybriden dynamischen Systemen. Auf Basis einer Erweiterung des Netz-Zustands-Modells wird eine neuartige **Topologie einer produkttoleranten Steuer- bzw. Regelung** aufgezeigt, die infolge eines **zusätzlichen Rekonfigurators** befähigt ist, die Dynamik des Systems in **Abhängigkeit der Produktbedürfnisse** anzupassen. Zudem wurden erstmals erforderliche **Strategien** für die **produktgetriggerte Kommunikation, Rekonfiguration und Interaktion in Abhängigkeit der Produktintelligenz** entwickelt. Auf Basis eines im Rahmen dieser Arbeit entstandenen **Entwurfsleitfadens** erfolgt die beispielhafte Synthese von produkttoleranten Steuer- und Regelungen am Beispiel von Simulationsmodellen und einem realen Prototypen.

Kapitel 6 erläutert neben den Grundlagen zur dynamischen Fertigungsplanung, 18 unterschiedliche Strategien, die mit dem Stand der Wissenschaft und Technik diskutiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges **produkt-individuelles dynamisches Planungsverfahren** entwickelt, welches im Wesentlichen auf einer **Weiterentwicklung des Highest Response Ratio Next-Verfahrens** aufbaut. Im Anschluss erfolgt die Vorstellung der eigens **entwickelten Simulationsumgebung für zellenbasierte Fertigungssysteme** und eine **Funktionsanalyse** des neuartigen produkt-individuellen dynamischen Planungsverfahrens.

Kapitel 7 zeigt die Konzeptionierung und Entwicklung des im Rahmen dieser Arbeit entstandenen **Forschungsdemonstrators**, mit dem Zielszenario einer **produkttoleranten Kerzenfertigung**. Zudem wird der **Aufbau** und die Funktion der **Wachsabfüllmaschine** sowie des **intelligenten Kerzenträgers** dargestellt.

Kapitel 8 diskutiert die Ergebnisse, die am Beispiel der produkttoleranten Kerzenfertigung mit den in Kapitel 3, 4, 5 und 6 neu entwickelten Konzepten und Verfahren erzielt wurden. Neben einer produkttoleranten Steuer- und Regelung der Wachsabfüllmaschine, wird das erweiterte Highest Response Ratio Next-Verfahrens in einer umfangreichen Simulationsstudie mit drei anderen Verfahren verglichen.

Abschließend sind die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf weitere Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten beschrieben.

2 Topologie flexibler Fertigungssysteme

Dieses Kapitel beschäftigt sich gezielt mit der Sichtweise eines FMS als CPPS. Hierfür werden zunächst die Hierarchie eines FMS dargestellt und die Klassifizierung der Flexibilität vorgenommen. Darauf aufbauend werden Organisationsstrukturen sowie vernetzte Steuer- und Regelungstopologien diskutiert. Dies ist grundlegend für die spätere Fertigung von Produkten mit hoher Variantenvielfalt und die aktive Integration von intelligenten Produkten innerhalb der Fertigungsautomation.

2.1 Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Wandelbarkeit

In den nachfolgenden Abschnitten wird zunächst die Hierarchie von flexiblen Fertigungssystemen erläutert. Im Anschluss erfolgt eine Definition und Klassifizierung dieser Systeme hinsichtlich Flexibilität, Rekonfigurier- und Wandelbarkeit.

2.1.1 Hierarchie flexibler Fertigungssysteme

Traditionell befindet sich die Flexibilisierung vor allem auf der Herstellungs- und Montageebene [EW09; TTV08]. Diese Sichtweise muss für zukünftige Betrachtungen bzw. Realisierungen von CPPS auf die gesamte Fabrik erweitert werden [EW09; Bau14]. EL-MARAGHY et al. definierten hierfür sechs korrespondierende Hierarchieebenen zwischen Produktion, Veränderlichkeit und den herzustellenden Produkten (siehe Bild 2-1).

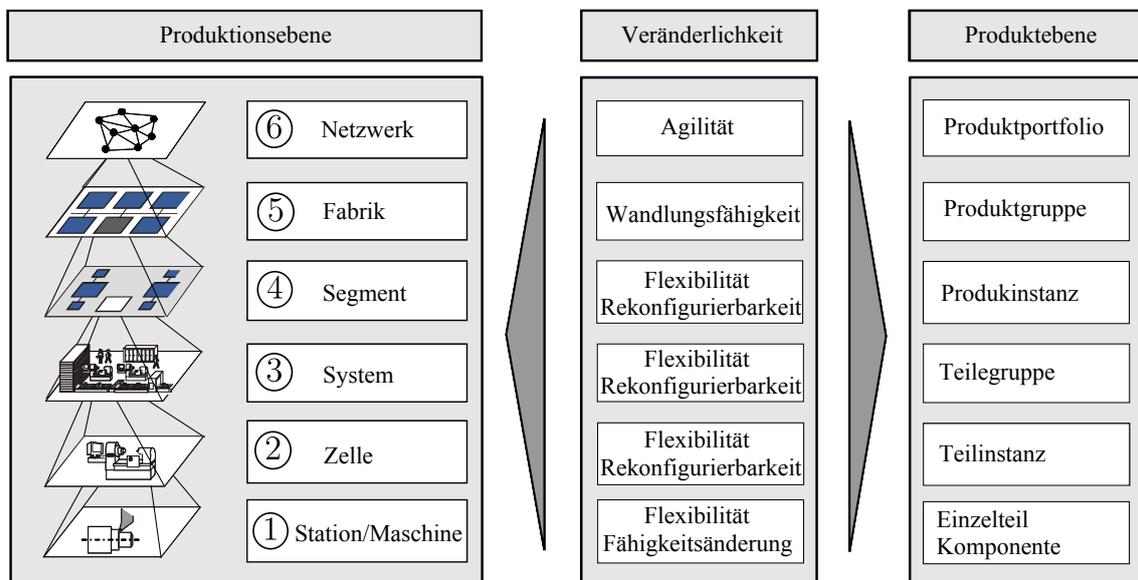


Bild 2-1: Korrespondierende Hierarchieebenen der Produktion, Veränderlichkeit und der Produkte (nach [EW09, S.11])

Die Basis dieser Struktur ist durch den zugrunde liegenden Fertigungsprozess gegeben, welcher durch Maschinen oder Facharbeiter durchgeführt wird. Das Hauptanliegen der untersten Ebene ① sind die wertschöpfenden Tätigkeiten, welche an einem Werkstückelement mithilfe der Flexibilität und der Fähigkeitsänderung durchgeführt werden. Flexibilität beschreibt die operative Fähigkeit einer Fertigungs- und Montageeinheit mit minimalem Aufwand und geringer Verzögerung eine Produktfamilie durch logische Programm- oder Abfolgeänderungen sowie Umleitung im gleichen System zu fertigen [EW09; Ost12].

Die Änderung der Fähigkeit einer einzelnen Maschine oder Station bezeichnet eine Operation, die an einem bekannten Werkstück zu jedem beliebigen Zeitpunkt mit minimalem Rüstaufwand und geringer Latenz durchgeführt werden kann [EW09]. Oftmals befinden sich mehrere Stationen oder Maschinen innerhalb einer Zelle ②, die typischerweise alle notwendigen Operationen für einen Fertigungsschritt d.h. eine Instanz zur Herstellung eines Teiles enthalten. Neben der Flexibilität ist in dieser Ebene die Rekonfigurierbarkeit erforderlich. Diese taktische Fähigkeit eines Produktions- und Logistikbereiches ermöglicht durch Einsatz von Zeit und Aufwand, die physikalische Änderungen der Fertigungsstruktur, des Materialflusses und logistische Funktionen wie bspw. das Entfernen und Hinzufügen von Komponenten einer Teilegruppe.

Die Verknüpfung mehrerer Zellen zu einem automatisierten Verbund wird häufig als Fertigungs- oder Montagesystem ③ bezeichnet, die zur Fertigung unterschiedlichster Varianten von Teilen eingesetzt werden und Flexibilität sowie Rekonfigurierbarkeit benötigen [EW09].

Ein Segment ④ bezeichnet eine endliche Menge von Systemen, die im automatisierten Verbund in der Lage sind ein versandfertiges Produkt herzustellen. Segmente enthalten gewöhnlich Systeme für die Fertigung, Montage, Pufferung, Qualitätssicherung sowie Verpackung [EW09].

Die Fabrik ⑤ stellt einen Knoten in einem oftmals globalen Produktionsnetzwerk dar, welche als eine ortsfeste Fertigungseinheit, bestehend aus mehreren Segmenten, zu verstehen ist [EW09]. Zur Herstellung einer Produktgruppe muss die Fabrik wandlungsfähig sein. Diese taktische Fähigkeit einer ganzen Fabrik ermöglicht die Umschaltung zwischen verschiedenen Produktgruppen. Hierfür sind strukturelle Eingriffe in die Produktions- und Logistiksysteme, in das Gebäudemanagement sowie in die Organisationsstrukturen und Prozessabläufe erforderlich [EW09].

Die höchste Hierarchieebene beschreibt das Produktionsnetzwerk ⑥, welches als geografisch verteilte Produktion zur Herstellung des gesamten unternehmensspezifischen Produktportfolios aufgefasst werden kann. Bedeutend für Unternehmen ist die strategische Fähigkeit der Agilität, welche die Reaktion auf veränderte Marktsituationen, die Erschließung neuer Märkte, die Weiterentwicklung des Produktportfolios sowie den Aufbau notwendiger Fertigungskapazitäten beschreibt [EW09].

Neben dem eigentlichen Systemverständnis von FMS bzgl. der Produktionsebenen, ist für die weiteren Betrachtungen eine genaue Einordnung und Erläuterung der Begriffe Flexibilität, Rekonfigurier- und Wandelbarkeit erforderlich.

2.1.2 Klassifizierung von Flexibilität, Rekonfigurier- und Wandelbarkeit

Aufgrund der zunehmenden Produktindividualisierung mit den einhergehenden höheren Anteilen an kunden- bzw. produktspezifischen Produktionsprozessen, ist die Flexibilität einer Produktion eine bedeutende Anforderung für die Durchführung von Wertschöpfungsprozessen in einer auftragsbezogenen Fertigung [ZO09; MKRW11; Ost12; OZ13]. Nach OSTGATHE bezeichnet der Begriff Flexibilität die Eigenschaft eines Systems, proaktive oder reaktive sowie zielgerichtete Änderungen der Systemkonfiguration vorzunehmen [Ost12]. Das Ziel hierbei ist es, sich den Anforderungen, welche aus den variierenden Prozess- und Produktbedingungen resultieren, anzupassen [Ost12]. Die Reaktionszeit zur Durchführung der Änderung, kann hierbei kurz-, mittel- oder langfristig sein [Ost12].

Zur Wahl des richtigen Maßes an Flexibilität für ein beliebiges Fertigungssystem haben TERKAJ et al. in [TTV09; TTV08] eine Ontologie der Flexibilität beschrieben, die im Folgenden näher betrachtet wird. Hierfür wurden zunächst vier Dimensionen der Flexibilität definiert, welche in Tabelle 2-1 erläutert sind. Es handelt sich hierbei um die Kapazität, die Funktionalität, den Prozess und die Fertigungsplanung.

Tabelle 2-1: Dimensionen der Flexibilität (nach [TTV09, S.52] und [TTV08, S.48])

Dimension	Definition
Kapazität	Das System kann die gleichen Operationen in unterschiedlichen Größenordnungen durchführen.
Funktionalität	Das System kann verschiedene Operationen bzw. Funktionen ausführen.
Prozess	Das System kann das gleiche Produkt auf verschiedene Weise herstellen.
Fertigungsplanung	Das System kann die Herstellungsreihenfolge eines Produktes bzw. die Ressourcenzuordnung ändern, so dass immer das gleiche Fertigungsergebnis erzielt wird.

Ergänzt wird jede Dimension der Flexibilität durch Attribute, die zu einer genaueren Beschreibung der Eigenschaften führen [TTV09]. Die Tabelle 2-2 erläutert die Attribute der Flexibilität, welche als Varianz, Auflösung, Beweglichkeit und Uniformität bezeichnet werden. Die Unterscheidung der Flexibilität in seine Dimensionen und Attribute ist geeignet für die Klassifizierung von gegebenen Systemen, betrachtet jedoch nicht die Tatsache, dass ein System zuvor nicht zur Verfügung stehende Eigenschaften und Fähigkeiten erwerben kann [TTV09; TTV08]. Diese Fähigkeit wird in der Literatur oftmals als Rekonfigurierbarkeit beschrieben [TTV09]. Zur Berücksichtigung dieses Sachverhaltes ergänzten TERKAJ et al. die Dimensionen und Attribute um eine Separation in die Ebenen der Flexibilität [TTV08; TTV09], welche in Tabelle 2-3 dargestellt ist.

Auf oberster Ebene 1 besitzt das System die **Flexibilität**, d.h. die geforderten Fähigkeiten gemäß der Dimensionen und Attribute aus Tabelle 2-1 bzw. 2-2. Die Ebene 2 beschreibt die **Rekonfigurierbarkeit**, wobei in diesem Fall das System die Fähigkeiten nicht besitzt, allerdings über die Grundvoraussetzungen verfügt um diese erwerben zu können. **Wandelbarkeit** bedeutet, dass ein System in der Lage ist, sich Grundvoraussetzungen zu erwerben. Dies ist auf Ebene 3 in Tabelle 2-3 dargestellt.

Tabelle 2-2: Attribute der Flexibilität (nach [TTV09, S.53] und [TTV08, S.49])

Attribut	Definition
Varianz	Veränderbarkeit des Systemverhaltens unter gegebenen Dimensionen. Die Varianz steigt mit der Vielfalt an zur Verfügung stehenden Optionen und Alternativen, die erreicht werden können. Beispielsweise zeigt die Dimension Funktionalität eine Menge von verschiedenen Operationen, die von dem System ausgeführt werden können.
Auflösung	Die Auflösung bezeichnet wie nahe die unterschiedlichen Alternativen in gegebenen Dimension beieinander liegen. Die Detaillierung steigt mit der Anzahl an Alternativen, die gleichmäßig über die Varianz verteilt sind. Am Beispiel der Dimension Funktionalität bedeutet dies, wie klein der Abstand zwischen verschiedenen Operationen ist, die ein System ausführen kann.
Beweglichkeit	Der Übergang von einem Verhalten zu einem Anderen innerhalb der Dimension wird als Beweglichkeit bezeichnet. Für die Dimension Funktionalität beschreibt dies den Sachverhalt, wie einfach ein System von einem Operationspunkt zu einem Anderen wechselt.
Uniformität	Änderung der Systemperformanz, während sich das System im Varianzbereich bewegt. Bei gleichbleibender Performanz ist die Uniformität hoch. Für die Dimension Funktionalität beschreibt dies bspw. den Unterschied in Fähigkeiten und Kosten während der Ausführung unterschiedlicher Operationen.

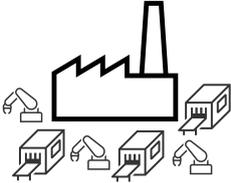
Aus Sicht der Fertigungs- und Prozessautomatisierung sind auch Mischformen unterschiedlichster Flexibilitätsformen denkbar [TTV09; TTV08]. Diese werden von TERKAJ et al. zwar erwähnt, allerdings nicht näher spezifiziert. Für eine vollständige Klassifizierung eignet sich hierfür die Definition der Flexibilität nach OSTGATHE, bei der zwischen den Bereichen der zu produzierenden Produkte, den für die Fertigung notwendigen Ressourcen und der jeweiligen Produktionsprozesse mit unterschiedlichen Merkmalen unterschieden wird [Ost12].

Tabelle 2-3: Ebenen der Flexibilität (nach [TTV09, S.54] und [TTV08, S.49])

Ebene	Definition
Ebene 1: Flexibilität	Das System hat die Fähigkeit.
Ebene 2: Rekonfigurierbarkeit	Das System kann die Fähigkeit erwerben und verfügt über die Grundvoraussetzungen.
Ebene 3: Wandelbarkeit	Das System kann die Grundvoraussetzungen erwerben.

Die Tabelle 2-4 zeigt neben den drei Flexibilitätsbereichen die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale. Infolge einer zunehmenden Anzahl an Produktvarianten [BK13], bei gleichzeitig abnehmenden Losgrößen und kürzeren Produktlebenszyklen, führt dies zu einer häufigeren Umstellung der Fertigung [Ost12]. Durch die steigende Anzahl von Aufträgen bzw. durch die Einführung neuer Produkte entstehen häufige Produktionsumstellungen. Im Flexibilitätsbereich des Produktes beschreibt die Auftragsflexibilität eines Fertigungssystems die Fähigkeit, eine begrenzte Anzahl an Produktvarianten ohne Umrüstaufwände herzustellen. Für eine schnelle und kostengünstige Einführung von neuen Produktvarianten in ein bestehendes Produktionssystem ist eine hohe Produktflexibilität erforderlich. Die Fähigkeit einer Fertigung, schwankende Stückzahlen auszugleichen, wird als Produktmengenflexibilität beschrieben [Ost12].

Tabelle 2-4: Flexibilitätsbereiche des Produktes, der Ressource und des Prozesses mit den Merkmalen der verfügbaren Flexibilität (in Anlehnung an [Ost12, S.17])

Produkt	Ressource	Prozess
		
Auftragsflexibilität Produktflexibilität Mengenflexibilität	Betriebsmittelflexibilität Produktionsflexibilität -	Arbeitsplanflexibilität Durchlaufflexibilität Erweiterungsflexibilität

Bei der Gestaltung und Auslegung von Maschinen und Anlagen sowie der Auswahl von Fertigungstechnologien wird der Flexibilitätsbereich Ressource besonders beeinflusst. Zur Herstellung einer breiten Varianz an Produkten werden hochintegrierte, flexible Anlagen und Maschinen benötigt [GC13; Ost12; BK13], die einen vielseitigen Einsatz bei veränderten Produktionsprozessen aufweisen [Ost12]. Unter der Betriebsmittelflexibilität ist die Fähigkeit einer Ressource, sich variierenden Fertigungs- und Produktionsaufgaben anzupassen, zu verstehen. Die Produktionsflexibilität beschreibt die Bandbreite an unterschiedlichen Produkten, die auf einer bestehenden Produktionsanlage gefertigt werden können.

Die Merkmale für den Flexibilitätsbereich Prozess umfassen die Fähigkeiten während der Produktionsdurchführung. Die Arbeitsplanflexibilität beschreibt die Fähigkeit, die Arbeitsvorgänge in einem Fertigungsauftrag nach mehreren, technologisch möglichen, Vorgangfolgen variieren zu können [Ost12]. Besitzt ein System die Fähigkeit, den Herstellungsprozess nach Ressourcenausfällen durch Redundanz oder alternative Fertigungsfolgen fortzusetzen, kann dies über die Durchlaufflexibilität dargestellt werden. Die Erweiterungsflexibilität beschreibt die Möglichkeit zur einfachen, modularen Erweiterung einer Anlage hinsichtlich Kapazität und der Fähigkeiten [Ost12].

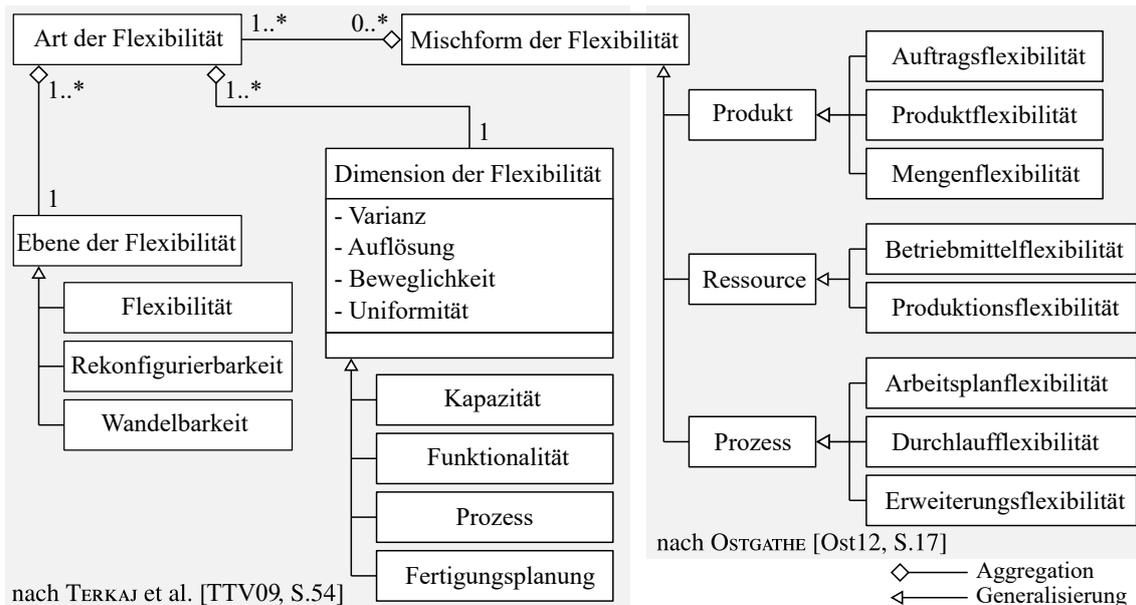


Bild 2-2: Klassendiagramm der Flexibilitätsdefinition (in Anlehnung an [TTV09, S.54] und [Ost12, S.17])

Zusammenfassend zeigt das Bild 2-2 die Struktur der Flexibilitätsdefinition mithilfe eines Unified Modeling Language (UML) Klassendiagramms¹. Die Basisklasse Mischform der Flexibilität vererbt ihre Eigenschaften an die Unterklassen der von OSTGATHE definierten Flexibilitätsbereiche: Produkt, Ressource und Prozesse. Diese vererben wiederum an die Merkmalsklassen (vgl. Tabelle 2-4). Andererseits muss die Klasse Mischform der Flexibilität mindestens eine Klasse Art der Flexibilität besitzen. Des Weiteren besitzt diese die Klassen Ebene und Dimension der Flexibilität, die sich gemäß der Tabellen 2-1, 2-2 und 2-3 in weitere Unterklassen und Attribute aufteilen.

Diese Darstellung ermöglicht eine detaillierte Analyse und Modellierung der in einem Automatisierungsprozess vorherrschenden oder im Rahmen einer neu zu planenden Anlage erforderlichen Flexibilität.

2.1.3 Resümee zur Hierarchisierung und Klassifizierung

In den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 wurden zunächst die Hierarchisierung von FMS bzw. RMS erläutert und im Anschluss die Begriffe Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Wandelbarkeit klassifiziert. Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Konzepte, Vorgehensweisen und Anwendungsbeispiele befinden sich auf den in Bild 2-1 gezeigten Produktionsebenen, ①, ② und ③. Infolgedessen sind die Stationen bzw. Maschinen sowie die Fertigungszellen von besonderem Interesse der Betrachtungen. Im Sinne der Flexibilitätsart (vgl. Bild 2-2) sind hierfür die Fähigkeitsebenen der Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit mit unterschiedlichsten Dimensionen und Attributen erforderlich (siehe Bild 2-1 und 2-2). Die Klassifizierung zeigt, dass die Flexibilität immer anwendungsspezifisch für die Automation des betrachteten Fertigungssystems spezifiziert werden muss.

¹Für weiterführende Informationen bzgl. UML wird auf [Rum11] verwiesen.

2.2 Automation von flexiblen Fertigungssystemen

Für die Realisierung verschiedenster Automatisierungsfunktion und -aufgaben kommen unterschiedliche Steuerungstopologien infrage. Diese hängen vom Aufgabentyp, des Zeithorizonts bzw. der Echtzeitbedingungen, der zu treffenden Entscheidungen und von den verwendeten Informationen ab [Lun12]. Zudem beschreibt die Fachwelt einen zunehmenden Trend in der Betrachtung von FMS als CPPS mit steigender dezentraler Autonomie [BK13; VKBW09]. Daraus folgt, dass die heute noch überwiegend existierende Automatisierungspyramide durch die Einführung von vernetzten und dezentralen Systemen schrittweise aufgelöst wird [BK13; VKBW09; Mon15]. Nachfolgend wird der Wandel in den Organisationsstrukturen diskutiert und hochflexible vernetzte dezentrale Steuerungs- und Regelungstopologien vorgestellt.

2.2.1 Organisationsstrukturen von flexiblen Fertigungssystemen

Die klassische Automatisierungspyramide wie sie z.B. von LUNZE in [Lun12, S.34] beschrieben und seit über 25 Jahren als Modell zur Entwicklung verwendet wird, teilt sich hierarchisch in fünf Ebenen auf. Direkt am technischen Prozess werden auf der untersten Ebene, der sogenannten Feldebene, Messdaten erfasst und das Stellen von Prozessgrößen realisiert. Die nächsthöhere Prozessleitebene ermöglicht die Realisierung von Steuerungen und Regelungen, die Datenaufzeichnung und Protokollierung, die Datenaufbereitung, Optimierung des Prozessablaufes, Realisierung von Rezepturen und die Mensch-Maschine Schnittstelle. Im Zuge der immer leistungsfähigeren Automatisierungsgeräte werden viele Regelungs- und Steuerungsaufgaben zunehmend von der Prozessleitebene in die Feldebene verlagert [BK13; VKBW09]. Oberhalb sind die Leitungsebenen eines Unternehmens angeordnet, die sich mit der Führung von Betrieben bzw. des gesamten Unternehmens befassen [Lun12]. Die Betriebsleitebene² befasst sich mit der kurzfristigen Produktionsplanung einschließlich der Ersatzplanung von Maschinen und Anlagen, Qualitätskontrolle, Langzeitarchivierung von Daten und der Rezepturverwaltung. Darauf aufbauend werden in der Produktionsleitebene³ die Lieferaufträge verwaltet und bearbeitet, Produktionsplanung durchgeführt und Termine überwacht sowie die Kostenanalyse durchgeführt. Die Unternehmensleitebene⁴ wird für die Unternehmensführung, für Marktanalysen, strategische Produktionsplanung sowie Personalplanung und Einsatz benötigt [Lun12].

Die eigentliche echtzeitkritische Realisierung von Automatisierungsaufgaben, welche auch für die nachfolgenden Betrachtungen relevant ist, wird auf den beiden untersten Ebenen der Automatisierungspyramide, d.h. der Feld- und der Prozessleitebene gelöst. Hierfür haben sich, die in Bild 2-3 dargestellten, drei Organisationsstrukturen (OS) in der Automatisierungstechnik etabliert. Es zeigt die zentrale, hybride und dezentrale OS zur Automatisierung in der Feld- und Prozessleitebene.

Zudem ist eine Abhängigkeit der Topologien hinsichtlich Optimierung und Flexibilität dargestellt, die in Tabelle 2-5 genauer spezifiziert wird. Im Falle einer zentralen Informationsverarbeitung sowie Steuerung der Prozesse werden alle Entscheidung und Infor-

²Oft auch als SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) Ebene bezeichnet.

³Hier wird das *Manufacturing Execution System* (MES) installiert.

⁴Realisiert über ein *Enterprise Resource Planning* (ERP) System.

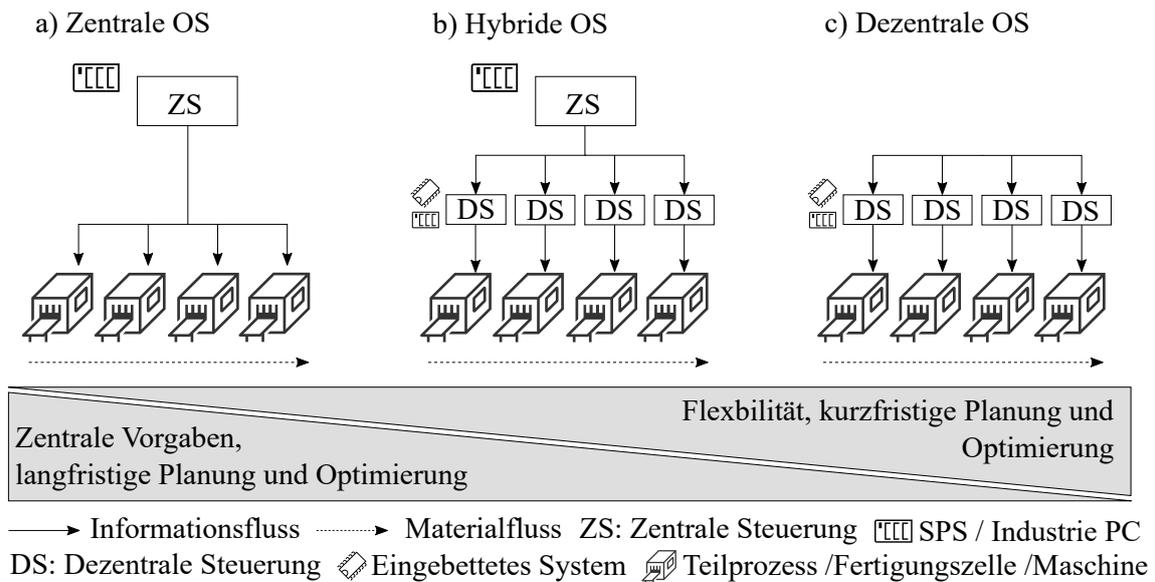


Bild 2-3: Grundformen der Organisationsstrukturen in Abhängigkeit der Kriterien Flexibilität, Planung und Optimierung (in Anlehnung an [Ost12, S.44])

mationen zentral verwaltet. Bei einer rein dezentralen Organisationsstruktur erfolgt die Entscheidungsfindung auf unterster Feldebene. Eine Kommunikation und Abstimmung der dezentralen Steuerungen untereinander ist hierbei möglich. Dabei handelt es sich um verteilte oder vernetzte dezentrale Steuerungstopologien. Die Mischform aus zentraler und dezentraler Steuerungsstruktur wird als hybride Organisationsform beschrieben. Hierbei werden weitestgehend die Vorteile der zentralen und dezentralen Automatisierung miteinander vereint.

Ein Vergleich wichtiger Kriterien für den Entwurf und die Realisierung von produktabhängigen Steuerungen und Regelungen ist in Tabelle 2-5 in Abhängigkeit der drei genannten Steuerungstopologien dargestellt. Zur Lösung einer hochflexiblen Automatisierungsaufgabe, wie z.B. einer produktgesteuerten Prozesssteuerung oder Regelung geht aus Tabelle 2-5 hervor, dass eine zentrale Steuerungsstruktur der Prozesse gänzlich ungeeignet ist. Im Sinne der Arbeitsplan-, Produkt- und Produktmengenflexibilität ist eine schnelle Reaktionszeit der Prozesse bzw. Fertigungssysteme maßgeblich. Diese Anforderung deckt sich im Wesentlichen mit den Kriterien lokale Autonomie bzw. Transparenz sowie der Berücksichtigung aktueller Produkt- und Ressourceninformation. Zudem müssen die Systeme in der Lage sein, sich hinreichend schnell an die neuen Umgebungs- bzw. Prozessbedingungen und wechselnde Produkteigenschaften zu adaptieren. Wobei dieses durch die Kriterien Adaption von Abläufen und Rekonfiguration dargestellt ist. Infolge von stark variierenden Produkteigenschaften ist die Robustheit des Prozesses ein sehr wichtiges Kriterium, da die Fertigung unter diesen Bedingungen ein stabiles Betriebsverhalten gewährleisten muss.

Tabelle 2-5: Vergleich der Organisationsstrukturen (in Anlehnung an [Ost12, S.48])

Kriterium	Zentrale OS	Hybride OS	Dezentrale OS
Globale Optimierung	●	◐	○
Zentraler Koordinationsaufwand	●	◐	○
Globale Transparenz	●	◐	○
Lokale Transparenz von Abläufen	○	◐	●
Lokale Autonomie	○	◐	●
Berücksichtigung aktueller Produktinformationen	○	●	●
Berücksichtigung aktueller Ressourceninformationen	○	●	●
Robustheit gegenüber Störungen	○	●	●
Adaption von Produktionsabläufen	○	●	●
Rekonfiguration von Ressourceneigenschaften	○	●	●

Erfüllungsgrad: hoch ●, mittel ◐ und gering ○

Bei der Wahl einer geeigneten Organisationsstruktur liegt die größte Herausforderung darin einen Kompromiss zwischen einem hohen Abstimmungsaufwand bspw. bei der zentralen OS und hohen Autonomiekosten bei der dezentralen OS zu finden [Ost12]. Alle drei genannten Organisationsstrukturen sind immer noch legitim, obwohl die klassische Automatisierungspyramide infolge der zunehmenden technologischen Revolution und dem gestiegenen Funktionsumfang der Feldgeräte ihre Gültigkeit verliert [VKBW09].

Klassische Aktoren zum Stellen einer Prozessgröße und Sensoren zum Messen von physikalischen Größen haben sich weiter entwickelt [VKBW09]. Heutzutage verfügen sie über eine enorme dezentrale Rechenleistung, können Algorithmen ausführen sowie die Anlagenverwaltung und die Instandhaltung unterstützen [VKBW09; BK13]. Des Weiteren gab es eine Veränderung der Gerätekommunikation, vom einfachen Senden und Empfangen der Aktoren hin zu teilnehmenden Geräten im Industrial Ethernet Netzwerk [BK13]. Ebenfalls fand in den letzten Jahren eine Reduzierung der Variantenvielfalt von industriellen Kommunikationsprotokollen statt, welches eine zunehmende und einfachere Vernetzung von dezentralen Feldbuskomponenten ermöglicht [VKBW09]. Mittlerweile verfügen diese über eine integrierte SPS-Funktionalität und ermöglichen die dezentrale Automatisierung sowie die Applizierung von verteilten Steuerungs- und Regelungskonzepten. Hierdurch kann eine hochflexible Modularisierung des Fertigungsprozesses erfolgen, weil jeder Subprozess mit einer dezentralen Steuerung automatisiert und mit allen anderen Subprozessen vernetzt ist. Aus dieser Vielzahl an neuen technologischen Möglichkeiten ist ersichtlich, warum die Automatisierungspyramide mit den streng hierarchischen und funktionsorientierten Schichten nicht länger den heutigen Standards entspricht [VKBW09; BK13; Mon15]. VOGEL-HEUSER et al. stellen in [VKBW09] ein neues Model zur Beschreibung und Klassifizierung der Automatisierung vor.

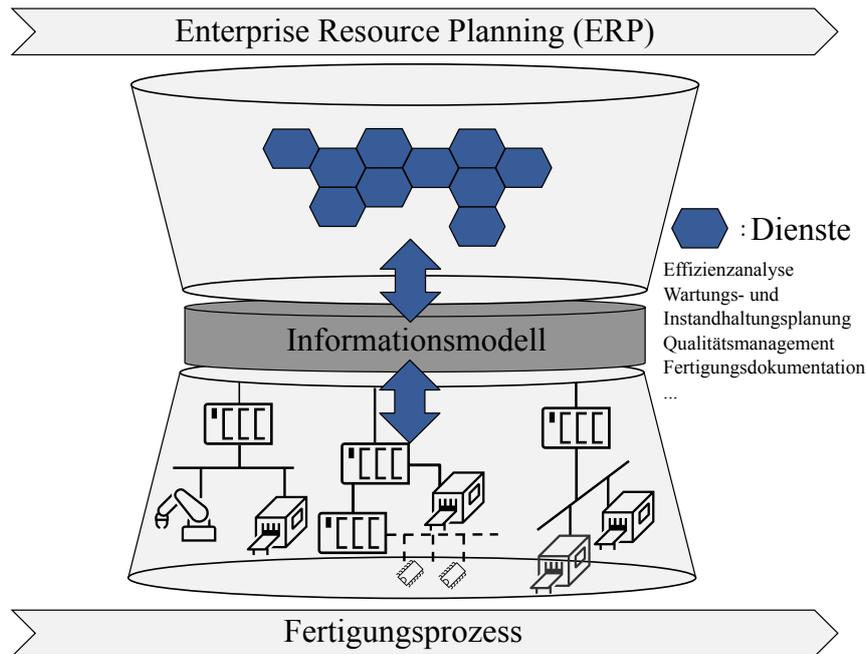


Bild 2-4: Ausschnitt aus dem DIABOLO-Modell (in Anlehnung an [VKBW09, S.114])

Das sogenannte DIABOLO⁵-Modell ist in Bild 2-4 dargestellt. Der Doppelkegel wird am Boden durch den Fertigungsprozess und an der Oberseite durch die Unternehmensleitebene bzw. das ERP eingefasst. Im unteren Kegel migrieren infolge der bereits genannten technologischen Fortschritte die Feld- und Prozesselebene aus der Automatisierungspyramide zu einem vernetzten und verteilten System, in dem prinzipiell die, in Bild 2-3 dargestellten, Steuerungsstrukturen auftreten können. Der obere Kegel repräsentiert eine dienstbasierte Management- und Organisationsebene in der SCADA- und MES-Funktionen zur Verfügung gestellt werden.

Die Informationsmodellschicht unterstützt die vertikale Integration, d.h. Sensoren und Aktoren können bidirektional ihre Daten mit dem MES-System austauschen. Prozessdaten werden von Feldgeräten erzeugt und anschließend durch eine Datenverarbeitung von anderen Automatisierungsgeräten im unten Kegel verarbeitet. Die Generation und Bereitstellung der Daten kann als eine Vielzahl von Informationsservern gesehen werden, die ihre Daten über das Informationsmodell dem oberen Kegel als Client zur Verfügung stellen. Jeder Client greift über Services auf die Server zu. Diese Architektur wird auch als serviceorientierte Architektur bezeichnet. Der gesamte Fertigungsprozess wird durch eine Kombination aus verschiedenen DIABOLO-Strukturen über eine horizontale Schnittstelle im Informationsmodell verbunden (nicht in Bild 2-4 dargestellt). Die nachfolgenden Betrachtungen beschäftigen sich insbesondere mit der Vernetzung, Verteilung und Dezentralisierung innerhalb des unteren Kegels im DIABOLO-Modell. Zudem befinden die nach ELMARAGHY et al. definierten Produktionsebenen (vgl. Bild 2-1) ①, ② und ③, in der die produktabhängige Flexibilisierung und Rekonfiguration stattfindet, ebenfalls im unteren Kegel.

⁵DIABOLO ist ein Akronym für *Distributed Information Architecture to Bolster Lifecycle Optimization* [VKBW09].

2.2.2 Steuerung und Regelung von flexiblen Fertigungssystemen

Zur Realisierung von FMS und RMS, im Sinne eines CPPS, ist die Auflösung der streng hierarchischen Automatisierungspyramide unabdingbar [VKBW09]. In Zukunft wird diese durch vernetzte und verteilte dezentrale Steuer- sowie Regelarchitekturen schrittweise ersetzt [VKBW09; BK13; PMD⁺14]. Zudem ist zu erwarten, dass die Topologie eines CPPS über die Lebensdauer gesehen nicht statisch ist, sondern sich wechselnden Anforderungen anpassen muss [VLL15]. Dies erfordert modulare Steuer- und Reglerstrukturen, die adaptiert oder ausgetauscht werden können [BK13]. Vielmehr sind diese als einzelne cyberphysische Systeme aufzufassen, die aus eingebetteten Systemen, speicherprogrammierbaren Steuerungen oder Industrie-PCs bestehen, die um globale Netzwerke erweitert wurden [Lun14].

Eine weitverbreitete Sichtweise für die Realisierung von vernetzten Steuerungs- und Regelungssystemen in der Automatisierungstechnik ist die Betrachtung als Agentensystem. Eine Vielzahl von Informationen, Definitionen und Applikationsbeispielen kann dabei aus den folgenden Literaturquellen und Richtlinien [WV06; VDI10; VDI12a; VDI12b; BTT13; BTT15; SVL13; ML15; DL14; RWL15; HS16] entnommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit sind die beiden nachfolgenden Definitionen eines Agenten bzw. Agentensystems ausreichend.

Nach der VDI/VDE Richtlinie 2653 Blatt 1 - Agentensysteme in der Automatisierungstechnik - Grundlagen ist ein Agent wie folgt definiert:

„Ein Agent ist eine abgrenzbare (Hardware- oder/und Software-) Einheit mit definierten Zielen. Ein Agent ist bestrebt, diese Ziele durch selbstständiges Verhalten zu erreichen und interagiert dabei mit seiner Umgebung und anderen Agenten“ [VDI10, S.3].

Der gesamtheitliche Begriff eines Multiagentensystems⁶ ist wie folgt zu verstehen:

„Ein Agentensystem besteht aus einer Menge von Agenten, die interagieren, um gemeinsam eine oder mehrere Aufgaben zu erfüllen“ [VDI10, S.3].

Dabei gilt es zu beachten, dass Laufzeitumgebungen, Ablaufsysteme und Plattformen für technische Agenten eine mögliche Basis zur Realisierung von Agenten darstellen, selbst aber keine Agentensysteme sind [VDI10].

Das Bild 2-5 a) zeigt den Aufbau einer vernetzten Steuer- beziehungsweise Regelung eines Agentensystems. Jedes Teilsystem Σ_n ($n \in \mathbb{N}$) hat eine lokale Steuer- bzw. Regelung R_n und ist in der Lage über das Kommunikationsnetzwerk zu interagieren. In der Regel weisen Agentensysteme keinerlei physikalische Kopplung auf, sind allerdings über den vernetzten Regler gekoppelt, um das gemeinsame Ziel erfüllen zu können [Lun14].

Physikalisch gekoppelte Systeme können durch vernetzte Regler bestehend aus den lokalen Reglern $R_{n,j}$ ($n, j \in \mathbb{N}$), den Teilprozessen $\Sigma_{n,j}$ und dem Kommunikationsnetzwerk geregelt werden [Lun14]. Der vernetzte Regler, wie in Bild 2-5 b) dargestellt, berücksichtigt hierbei die zusätzlichen Kopplungen des Gesamtsystems Σ_n bspw. eine Maschine mit den Teilsystemen $\Sigma_{n,j}$.

⁶Der englische Begriff lautet "multi-agent system".

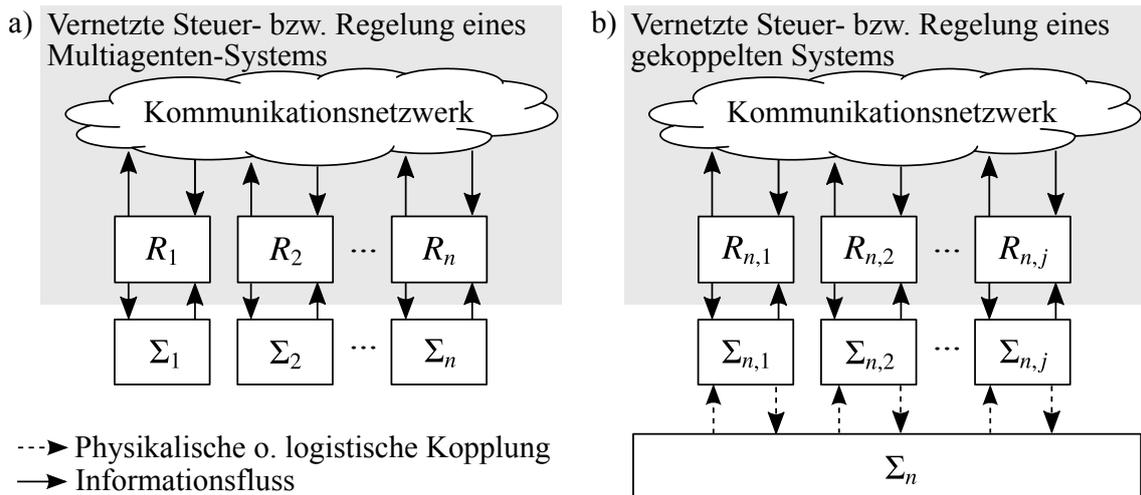


Bild 2-5: Vernetzte Steuerung und Regelung: a) Multiagentensystem und b) gekoppeltes System (in Anlehnung an [Lun14, S.265])

Die in Bild 2-5 b) gezeigte Betrachtungsweise ist nach LUNZE insbesondere dann zielführend [Lun13]:

- wenn untersucht werden soll, welche Verkopplungen notwendig bzw. zweckmäßig sind, um die geforderte Regelgüte sicher zu stellen,
- wenn die Auswirkung von limitierten Kommunikationseigenschaften wie, Zeitverzögerungen im Datenaustausch, Paketverlusten oder zeitweise Einschränkungen der Konnektivität des Netzwerkes auf das Systemverhalten, untersucht werden soll oder
- wenn eine Vernetzung zwingend notwendig ist, um die gewünschte Systemdynamik und Funktion des Prozesses zu erfüllen.

Die größte Herausforderung liegt hierbei im Verständnis der gegenseitigen Beeinflussung zwischen den dynamischen Systemeigenschaften und der topologischen Beschaffenheit des Kommunikationsnetzwerkes [Lun14]. Dies muss allerdings immer spezifisch für jede Regelungs- und Steuerungsaufgabe individuell analysiert werden, da die physikalischen Kopplungen stets vom betrachteten Prozess abhängen. Eng hiermit verbunden ist ebenfalls der Aufbau des Kommunikationsnetzwerkes bzw. der Grad der Vernetzung, weil der betrachtete Prozess die Auswahl an zur Verfügung stehender Aktorik, Sensorik und somit auch möglicher Regelungskonzepte eingrenzt [Lun14].

Das Kommunikationsnetzwerk erlaubt einen direkten Datenaustausch zwischen den lokalen Reglern. Diese Vernetzung kann genutzt werden, um die Gesamtleistung des Systems/Prozesses zu verbessern [Lun14]. Die Theorie vernetzter Regelungs- und Steuerungstopologien beschreibt die Interaktion der Cybersysteme, wie z.B. dem Regler und dem Netzwerk [Lun14]. Zudem werden die physischen Systeme berücksichtigt, womit die eigentlichen Prozesse, Regelstrecken, Fertigungszellen und Maschinen gemeint sind. Die zukünftige Entwicklung der Vernetzung kann von einem derzeitigen Netzwerk der Informationen zu einem Netzwerk von Aktionen angesehen werden [Lun14]. Bei einem Netzwerk der Informationen fließen die Daten hauptsächlich zur zentralen Steuerung der physischen Systeme [Lun14]. Im Gegensatz dazu können bei einem Netzwerk der Aktionen die Subsysteme untereinander und mit der zentralen Steuerung, ganz im Sinne eines geschlossenen Regelkreises, interagieren [Lun14]. Für die klassische Reglersynthese, wie sie z.B. in [Föl13]

dargestellt ist, wird davon ausgegangen, dass die Kommunikation und die Berechnung des Regelalgorithmus hinreichend performant ist und somit keine wesentliche Zeitverzögerung mit sich bringt. Bei der vernetzten Regelung müssen allerdings Kommunikationsgrenzen und die Verfügbarkeit von Informationen für die Planung des Ablaufs, beispielsweise für die Änderungen einer Regelstrategie, berücksichtigt werden [Lun13; Lun14]. Kenngrößen für die Bewertung eines Kommunikationsnetzwerkes sind bspw. eine limitierte Bandbreite, Zeitverzögerungen beim Datenaustausch, Paketverluste oder zeitweise Einschränkungen der Konnektivität des Datennetzes [Lun14].

Für spätere Betrachtungen ist die in Bild 2-5 b) dargestellte Topologie der vernetzten Steuerungen und Regelungen für ein verkoppeltes System zielführend. Hiermit kann die Dynamik verteilter und vernetzter dezentraler Teilprozesse unter Berücksichtigung von variierenden Produkteigenschaften und dem Einfluss von intelligenten Produkten untersucht werden. Zur Definition der Fähigkeiten eines lokalen geregelten Teilsystems der in Bild 2-5 b) gezeigten Topologie wird im Folgenden der Begriff der Quasi-Dezentralität in Anlehnung an BAKULE [Bak14] und SUN et al. [SE08] formuliert.

Definition 1 *Quasi-Dezentral*

*Ein System kann als **quasi-dezentral** bezeichnet werden, wenn alle für den fehlerfreien (Teil-)Prozess zutreffenden Entscheidungen infolge der lokalen Autonomie dezentral getroffen werden können und ein stabiles Systemverhalten sichergestellt ist. Der lokale Funktionsumfang umfasst hierbei die Steuerung, Regelung, Adaption und Rekonfiguration. Zudem kann das System falls benötigt mit anderen quasi-dezentralen/zentralen Systemen über Kommunikationswege in einem verteilten Verbund interagieren.*

2.3 Fazit und Zusammenfassung

Zu Beginn des Kapitels wurde die Hierarchie eines flexiblen Fertigungssystems definiert. Nach der Definition von ELMARAGHY et al. sind im Rahmen dieser Arbeit die Maschinen-, Zellen- und Systemebene im zentralen Fokus der Betrachtungen. Im Anschluss erfolgte die Klassifizierung der erforderlichen Flexibilität. Diese wurde neben unterschiedlichen Ebenen, in Dimensionen und Attribute sowie Mischformen unterteilt und als UML Klassendiagramm definiert. Des Weiteren wurde die Automation von flexiblen Fertigungssystemen erläutert, bei der die Organisationsstrukturen sowie die vernetzte Steuer- und Regelung diskutiert wurden. Für die Realisierung von FMS ist die Verwendung einer dezentralen OS zielführend. Im Wesentlichen überzeugt die Dezentralisierung durch: die lokale Transparenz von Abläufen, die lokale Autonomie, die Berücksichtigung von aktuellen Produkt- und Ressourceninformationen, die Robustheit gegenüber Störungen und die geringe Reaktionszeit bei der Adaption/Rekonfiguration von Abläufen bzw. Ressourceneigenschaften. Zur Automation einer flexiblen Fertigungsmaschine ist eine vernetzte Steuer- und Regelung, welche die physikalischen bzw. logistischen Kopplungen zwischen dem zu fertigenden Produktvarianten berücksichtigt, ausgewählt worden. Zudem kann innerhalb dieser Struktur das intelligente Produkt als zusätzliches aktives Steuerungselement im eigenen Fertigungsprozess integriert werden.

3 Produktintelligenz in der flexiblen Fertigungsautomation

Die zunehmende Individualisierung von Gütern und Produkten führt zu einem Anstieg der zur Herstellung benötigten variantenspezifischen Komponenten [Ost12]. Daraus resultiert unmittelbar ein Rücklauf der standardisierten Bauteile und somit eine zunehmende Produktvarianz und steigende Produktkomplexität [Ost12]. In vielen Produktions-, Fertigungs- und Logistikprozessen wird aus diesem Grund jedem zu fertigendem Produkt eine Intelligenz in Form einer Identifikationsmarke hinzugefügt [Ost12; MGWH13].

In diesem Kapitel werden zunächst Schlüsseltechnologien für die Produktidentifikation vorgestellt, die grundlegend sind für die nachfolgende Definition und Klassifizierung der Produktintelligenz. Zudem wird die informations- und datenbasierte Integration eines intelligenten Produktes, basierend auf einem neu entwickelten Daten- und Schnittstellenmodells, innerhalb eines Fertigungsprozesses gezeigt.

3.1 Schlüsseltechnologien für die Produktidentifikation

Aus Sicht der Prozess- und Fertigungstechnik werden die folgenden Technologien am häufigsten zur Produktidentifikation für die flexible Automation von Herstellungsprozessen verwendet [FM10]:

- Strich- bzw. Barcode-Systeme werden seit über 20 Jahren für die Identifikation von Gütern und Produkten eingesetzt. Hierbei werden die Daten, d.h. eine eindeutige Identifikationsnummer, in parallelen Strichen mit unterschiedlicher Dicke und unterschiedlichem Abstand zueinander abgebildet. Die Datenerfassung erfolgt durch ein optoelektronisches Lesegerät. Diese sehr kostengünstige Technologie ist weit verbreitet, hat allerdings eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen [FM10].
- DataMatrix-Systeme sind eine Weiterentwicklung der Barcodesysteme, mit den Vorteilen einer wesentlich höheren Informationsdichte und einer besseren Störungsempfindlichkeit gegenüber den Umgebungsbedingungen [Ost12].
- *Optical Character Recognition* (OCR) bezeichnet Verfahren zur Klarschrifterkennung. Für diese Systeme wurden spezielle Schrifttypen entwickelt, die sowohl von Menschen als auch von Maschinen gelesen werden können. Die wesentlichen Vorteile sind die hohe Informationsdichte und die Möglichkeit einer visuellen Kontrolle. Allerdings ist die Lesereichweite sehr gering [FM10].
- *Radio Frequency Identification* (RFID)-Systeme finden seit einigen Jahren immer mehr Verwendung in der Prozessautomatisierung. Hierbei handelt es sich um Identifikationssysteme, die über eine kapazitive bzw. magnetische Kopplung oder über elektromagnetische Funkwellen bidirektional Daten und die benötigte Energie zwischen einem Lese-/Schreibgerät und einem Transponder austauschen können. Die RFID-Transponder, umgangssprachlich oftmals als RFID-Tag bezeichnet, sind in verschiedensten Ausführung und Funktionen erhältlich, d.h. von der einfachen Diebstahlsicherung im Kaufhaus bis hin zu energieautarken Sensorknoten, die untereinander

der kommunizieren können [FM10]. Zudem können die speicherbaren Datenmengen von einem Bit bis hin zu mehreren Kilo-Byte variieren [FM10]. RFID-Systeme überzeugen gerade bei Anwendungen in rauen Umgebungsbedingungen, bei denen prozessbedingt keine optische Datenübertragung möglich ist.

Die Auswahl der richtigen Identifikationstechnologie hängt immer stark von der jeweiligen Automatisierungsaufgabe und den Umgebungsbedingungen im Prozess ab und kann nicht pauschal definiert werden. Eine detaillierte Gegenüberstellung und Vergleich der genannten Systeme bezüglich ihrer Performanz und spezifischen Eigenschaften ist in [FM10, S.7] zu finden.

Die vorgestellten automatischen Identifikationssysteme (Auto-ID-Systeme) bilden die technologische Basis für die Realisierung einer Produktintelligenz für die Automatisierungstechnik. McFARLANE et al. zeigten und verglichen in [MGWH13] und [MSC⁺03] eine Vielzahl von Definitionen und Realisierungen von intelligenten Produkten. Im Folgenden wird der Begriff der Produktintelligenz definiert und anschließend für eine systematische Auswahl klassifiziert.

3.2 Definition der Produktintelligenz

Die folgenden drei Definitionen der PINT nach McFARLANE et al., KÄRKKÄINEN et al. und VENTÄ beschreiben die wesentlichen Charakteristika intelligenter Produkte für die flexible Prozess- und Fertigungsautomation.

3.2.1 Definition nach McFARLANE et al.

Produktintelligenz beschreibt im Sinne von McFARLANE et al. einen physischen Auftrag oder eine Produktinstanz, der mit Informationen und Regeln verknüpft ist. Basierend darauf ist die Art und Weise, wie ein Produkt herstellt, gelagert oder transportiert wird, eindeutig definiert. Hierdurch hat das Produkt selbst die Möglichkeit die Vorgänge innerhalb der eigenen Fertigung zu beeinflussen [MGWH13, S.4]. Zudem weist ein intelligentes Produkt (Instanz oder Bestandteil eines Auftrages) die folgenden fünf Charakteristika auf [MGWH13, S.4]:

1. Das Produkt besitzt eine eindeutige und einmalige Identität.
2. Das Produkt ist in der Lage, wirksam mit seiner Umwelt zu kommunizieren.
3. Das Produkt beinhaltet Daten über sich selbst oder kann diese speichern.
4. Das Produkt unterstützt eine/n Sprache/Schnittstelle/Standard, um seine Eigenschaften bzw. Produktionsanforderungen zu übermitteln.
5. Das Produkt ist in der Lage, selbst oder durch Bereitstellung relevanter Entscheidungen, über seine eigene Produktion zu verfügen.

Basierend auf dieser Definition klassifizierten WONG et al. die Intelligenz von Produkten in zwei Level [WMAA02]. Produkte, welche die Eigenschaften Eins bis Drei erfüllen, sind informationsorientiert und entsprechen einer Level 1 Produktintelligenz. Ein Produkt mit

Level 2 Produktintelligenz verfügt über alle Eigenschaften und ist als entscheidungsorientiert einzustufen.

Dieser generische Klassifizierungsansatz in zwei Level basiert auf einer klaren Trennung zwischen dem aktuellen Produkt und seinem informationsbasierten Gegenstück [MFH09]. Diese Beschreibung zielt auf die Verwendung von RFID-Technologien für Fertigungs- und Logistikanwendungen ab, ohne dass das Produkt über eingebettete Verarbeitungs- und Kommunikationsfunktionen verfügt [MFH09].

3.2.2 Definition nach KÄRKKÄINEN et al.

Die Grundidee in der Definition der PINT nach KÄRKKÄINEN et al. ist, dass die Produkte selbstständig ihren eigenen Logistik- und Fertigungsprozess steuern und kontrollieren [MFH09]. Hierfür sollten die Produkte über folgenden Eigenschaften verfügen [MFH09]:

1. Das Produkt besitzt einen globalen eindeutigen Code zur Identifikation.
2. Verknüpfungen zu Informationsquellen über das Produkt sind im Identifikationscode enthalten oder können durch den Zugriff auf Nachschlagemechanismen wie bspw. Datenbanken eingeholt werden.
3. Das Produkt kann bei Bedarf mit einem Informationssystem kommunizieren und übermitteln, was mit ihm gemacht werden soll (auch pro-aktiv).

In dieser Definition umfasst die Klassifizierung im einfachsten Fall keine Intelligenz (1. Eindeutige Identifikationsnummer) bis hin zu einem entscheidungsorientierten Produkt welches die 3. Eigenschaft erfüllt und annähernd der Definition nach McFARLANE et al. entspricht. Allerdings fokussieren KÄRKKÄINEN et al. die eingebetteten Datenverarbeitungsfähigkeiten und den gesamten Produktlebenszyklus ebenfalls basierend auf RFID-Technologien [MFH09].

3.2.3 Definition nach VENTÄ

Die Definition nach VENTÄ besagt, dass ein intelligentes Produkt in der Lage sein muss [MFH09]:

1. Seinen Status und die Umwelt kontinuierlich zu überwachen.
2. Auf variierende Umwelt- und Betriebsbedingungen zu reagieren bzw. sich adaptieren.
3. Optimale Performanz unter variablen Umständen und auch in Ausnahmefällen einzuhalten.
4. Aktive Kommunikation mit dem Bediener, der Umwelt oder mit anderen Produkten und Systemen zu ermöglichen.

Diese Definition ist fokussiert auf entscheidungsorientierte Produkte, welche auch durch den Punkt 5. nach McFARLANE et al. und den Punkt 3. nach KÄRKKÄINEN et al. widerspiegelt werden. Allerdings geht VENTÄ von Produkten aus, die mit ausreichend eingebetteter

Rechenperformanz ausgestattet sind und über eine direkte Kommunikation mit anderen Informationssystemen verfügen.

Das Haupteinsatzgebiet ist der Betrieb und die Wartung von Produkten im Gebrauch mit wenig oder ohne Berücksichtigung der Fertigungs- und Logistikprozesse. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu den ersten beiden Definitionen, die sich vor allem mit den Produkten befassen, die eine Identifizierung wie beispielsweise einen Barcode oder ein RFID-Transponder besitzen, welche eine externe Informationsspeicherung und Kommunikationseinrichtungen benötigen [MFH09].

3.2.4 Resümee der Definitionen von Produktintelligenz

Alle drei Definitionen konzentrieren sich auf bestimmte Aspekte bzw. nur ein Teilgebiet von spezifischen Eigenschaften oder Anwendungsgebieten und decken nicht die Gesamtheit des Begriffes Produktintelligenz ab [MFH09]. Um diesen genauer spezifizieren zu können, ist eine weitere Klassifizierung erforderlich, die es ermöglicht, unterschiedliche Intelligenzarten systematisch zu unterscheiden und Informationsstrukturen für beliebige Automatisierungsaufgaben zu analysieren.

3.3 Klassifizierung von intelligenten Produkten

Der Intelligenzgrad eines Produktes kann von sehr gering z.B. einem Barcode bis hin zu proaktiven Produkteinheiten variieren, welches den Hauptfokus der Definitionen und Klassifizierungen nach McFARLANE et al. und KÄRKKÄINEN et al. [MGWH13; MFH09] darstellt. MEYER et al. erweiterten die Klassifizierung der Produktintelligenz zudem in drei Oberkategorien [MFH09]: dem Intelligenzgrad, der Entscheidungslokalität und dem Intelligenzträger. Im Folgendem werden diese Begriffe noch präziser unterteilt:

1. Der **Intelligenzgrad** beschreibt die eigenständigen Fähigkeiten eines Produktes und wird in drei Unterkategorien aufteilt.
 - a. Die **Informationsverarbeitung** beschreibt, dass ein intelligentes Produkt in der Lage ist einen Datenaustausch bspw. mit einem RFID-Lesegerät zu ermöglichen. Allerdings ist das Produkt nicht in der Lage seinen eigenen Fertigungsprozess zu steuern, dies muss von Extern erfolgen.
 - b. **Problemmeldung** beschreibt die Fähigkeit, dass ein Produkt selbst seine Umgebung wahrnimmt und z.B. eine zu hohe Umgebungstemperatur an einen externen Prozess mitteilt. Das Produkt ist hierbei ebenfalls noch nicht in der Lage seinen eigenen Produktionsprozess zu steuern.
 - c. Die **Entscheidungsfindung** beschreibt die höchste Stufe der PINT und ermöglicht, dass das Produkt selbst über seinen eigenen Fertigungsprozess entscheidet und diesen ohne externe Einflüsse steuern kann.
2. Die **Entscheidungslokalität** beschreibt die örtliche Lokalität der Produktintelligenz im Bezug auf die Fähigkeiten eines intelligenten Produktes und wird nach McFARLANE et al. [MGWH13] und nach MEYER et al. [MFH09] zwischen zwei Unterkategorien unterschieden:

- a. **Off-board Intelligenz**⁷ bedeutet, dass das Produkt selbst keine Entscheidungen treffen kann. Es liefert lediglich Informationen, wie z.B. eine eindeutige Identifikationsnummer, und kann falls möglich einige wenige Parameter speichern. Der Zugriff auf die Daten des Produktes erfolgt ausschließlich lesend. Die Intelligenz ist hierbei auf anderen dezentralen Prozessstationen in Form von Instanzen implementiert. Die aufgrund der vom Produkt gelesenen Informationen oder aus produktabhängigen Datenbankeinträgen ihre Entscheidungen treffen. Beispiele hierfür sind: Bar- bzw. DataMatrix-Code (Klasse 1) und ein RFID-Chip mit einigen Byte-Speicherplatz (Klasse 2).
 - b. Bei der **On-Board-Intelligenz**⁸ verfügt das Produkt selbst über die Fähigkeit, mittels entsprechender Algorithmen auf einem Mikrocontroller, Entscheidungen hinsichtlich des eigenen Fertigungs- und Logistikprozesses zu treffen. Ein RFID-Chip mit Speicherplatz und einem Controller für die Datenverarbeitung entspricht hierbei einem intelligenten Produkt der Klasse 3. Haben verschiedene Produkte untereinander die Möglichkeit zu interagieren, z.B. über eine direkte Funkverbindung, sind diese in Klasse 4 einzuordnen.
3. Der **Intelligenzträger** bezeichnet die räumliche Integration der Produktintelligenz und wird zwischen zwei Unterkategorien unterschieden:
- a. Der/das **intelligente Gegenstand/Produkt** beschreibt die Tatsache, dass die Intelligenz örtlich im herzustellenden Halbzeug/Produkt integriert ist.
 - b. Ein **intelligenter Werkstückträger** (WT) wird hingegen benutzt, um ein Produkt zu transportieren. Die Produkte selbst verfügen über keinerlei Intelligenz.

Die zuvor aufgeführten Klassifizierungen 1. bis 3. zeigen bereits eine detaillierte Unterteilung der PINT. Essenziell für die Lösung einer produkttoleranten Automation ist eine systematische und technologische Klassifizierung der Produktintelligenz, die in vorherigen Punkten nicht im Fokus stand.

Durch die Zusammenführung der Definition in Off- und On-board Intelligenz mit der Unterteilung von intelligenten Produkten in Abhängigkeit ihrer Fähigkeiten nach OSTGATHE [Ost12], welche in Tabelle 3-1 dargestellt ist, können technologische Lösungsansätze im Rahmen dieser Arbeit detaillierter spezifiziert werden.

OSTGATHE klassifiziert vier Klassen von Produktintelligenz, die sich durch vier Produktfähigkeiten, der Identifikation, der Bereitstellung von Speicherplatz, die Möglichkeit Daten zu Verarbeiten und mit anderen Prozessteilnehmern zu interagieren, unterscheiden [Ost12]. Die Unterscheidung der Klasse 3. und 4. wird in der Regel durch eine aufwendigere Software innerhalb des Produktes und zudem einer potenziell höheren Rechenleistung von dem im Produkt integrierten Mikrocontroller realisiert.

Durch die Kombination der Klassifizierungsformen zeigt die Tabelle 3-1 eine klare örtliche Aufteilung der PINT zwischen den Teilnehmern Produkt, Prozess und Datenbank (DB) sowie die erforderlichen Fähigkeiten des intelligenten Produktes. Oftmals ist es allerdings nicht erforderlich, dass die für die flexible Fertigung erforderliche PINT nach Produktionsende örtlich im Produkt verbleibt. Stattdessen werden intelligente Werkstückträger verwendet [MFH09].

⁷Nach MEYER et al. auch als *Intelligence through Network* bezeichnet [MFH09].

⁸Nach MEYER et al. auch als *Intelligence at object* bezeichnet [MFH09].

Tabelle 3-1: Klassifizierung der unterschiedlichen Arten von Produktintelligenz (in Anlehnung an [BT15, S.2], [Ost12, S.54] und [MGWH13, S.81])

Off-board Intelligenz		On-board Intelligenz	
Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4
Identifikation	Identifikation	Identifikation	Identifikation
-	Speicherplatz	Speicherplatz	Speicherplatz
-	-	Datenverarbeitung	Datenverarbeitung
-	-	-	Interaktion

Durch Zusammenführung der Unterteilung nach MEYER et al. [MFH09] (siehe 1. bis 3.), der Unterscheidung in Fähigkeiten nach OSTGATHE [Ost12] (siehe Tabelle 3-1 und der Klassifizierung nach McFARLANE et al. [MGWH13] (siehe 2.) ergibt sich ein dreidimensionales Klassifikationsmodell für intelligente Produkte, welches in Bild 3-1 a) dargestellt ist. Hieraus geht eine Spezifikation der Produktintelligenz durch die Fähigkeiten, der Entscheidungslokalität und des Intelligenzträgers hervor, die als eine Art Freiheitsgrad angesehen werden können.

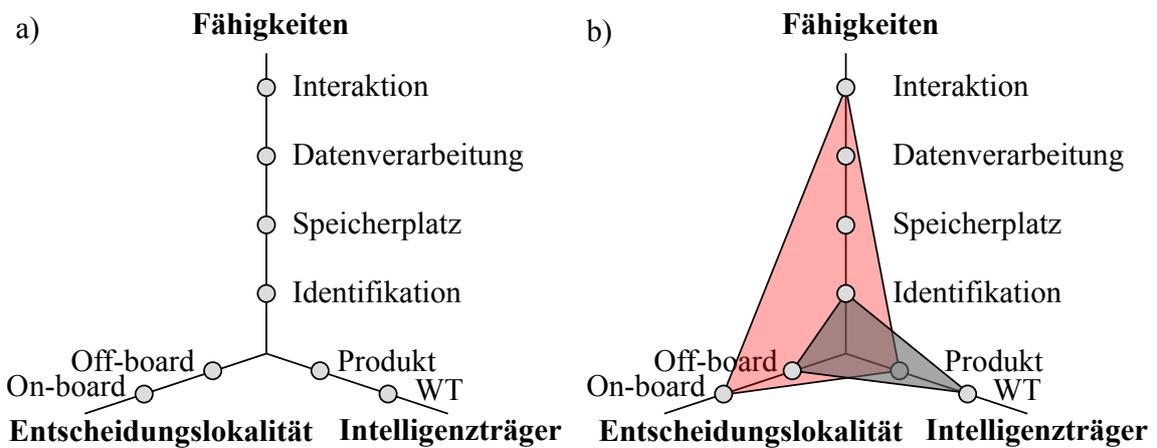


Bild 3-1: a) Klassifikationsmodell für intelligente Produkte b) Beispiele für ein intelligentes Produkt der Klasse 4 (rot) und einen Werkstückträger mit Barcode (grau)

Das Bild 3-1 b) zeigt beispielhaft ein intelligentes Produkt der Klasse 4 (rot) (vgl. Tabelle 3-1). Des Weiteren ist ein einfacher intelligenter Produkt- oder Werkstückträger dargestellt (grau), welche über ein Barcode identifiziert werden kann und die Produktintelligenz an anderen Systemen im Netzwerk zur Verfügung steht.

Die Frage, welche Intelligenz für welchen Prozess benötigt wird, muss immer individuell in Abhängigkeit der Anforderung an die Automatisierungsaufgabe entschieden werden. Aus diesem Grund zeigt Abschnitt 5.3 einen Leitfaden zur Integration von Produktintelligenz in die dezentrale Automation von zellenbasierten Fertigungssystemen.

3.4 Informations- und Datenstrukturen intelligenter Produkte

Nahezu zeitgleich zur Auswahl der Produktintelligenz für ein gegebenes Automatisierungsproblem muss der Informationsaustausch zwischen der in Tabelle 3-1 dargestellten Teilnehmer, d.h. dem Produkt, dem Prozess und der Datenbank, definiert werden.

Grundlegend hierfür sind Datenmodelle für den produktabhängigen Informationsaustausch [Ost12]. Zudem müssen die erforderlichen Schnittstellen zwischen allen Prozessteilnehmer für eine reibungslose Kommunikation und den Austausch von Daten spezifiziert werden.

Speziell für die Anwendung in einem produktbasierten flexiblen Fertigungsprozess definierte OSTGATHE ein umfangreiches Datenmodell [Ost12]. Dieses umfasst alle Informationen von zugehörigen organisatorischen Daten, verfahrens- und ablaufspezifische Daten zu den einzelnen Arbeitsvorgängen sowie detaillierte Angaben zum Zustand eines Werkstückes [Ost12, S.83 ff.]. Dieses Modell diente als Grundlage für die Modellierung von produktindividuellen Prozessketten sowie zur Modularisierung von Produktionsabläufen. Hierbei wurden Produkt- und Prozessmodule als organisatorische Bausteine aufgefasst und zur Modellierung der Prozessstrukturen durch PETRI-Netze verwendet [Ost12]. Das Modell wurde gemäß der anerkannten Unterteilung in die Bereiche Produkt, Ressource und Prozess untergliedert [Ost12], welche bereits in der Definition der Flexibilitätsbereiche (siehe Tabelle 2-4 und in Bild 2-1) angewendet wurde.

Analog hierzu wählten COLLEDANI et al. in [CTT08, S.63 ff.] und MCFARLANE in [MG-WH13, S.76 ff.] eine identische Strukturierung für ein UML-basiertes Datenmodell zur Beschreibung von Informationszusammenhängen bei der Entwicklung von flexiblen Fertigungssystemen.

Die Tabelle 3-2 beschreibt in Anlehnung an [Ost12] die Klassifizierung der produkt- bzw. prozessspezifischen Informationen hinsichtlich der Organisation, Technologie, Geometrie, Struktur und der Dokumentation. In Abhängigkeit des Detaillierungsgrades kann diese Informationsstruktur für ein betrachtetes Automatisierungsproblem eine hohe Komplexität aufweisen. Zudem sind mitunter nicht immer alle dargestellten Informationen und Kategorien erforderlich.

Tabelle 3-2: Informationsstruktur für die Beschreibung eines Datenmodells für das Produkt und den Prozess/Ressource (in Anlehnung an [Ost12, S.87 ff.])

	Organisation	Technologie	Geometrie	Struktur	Dokumentation
Produkt 	Produkt-Nr.	Werkstoff	Abmessungen	Einzelteil	Handshake
	Produktname	Oberfläche	Masse	Variante	Zeitstempel
	Auftrags-Nr.		Formelement		
	Liefertermin				
Prozess 	Stations-Nr.	Oberflächen	Formbibliothek	Teileliste	Status
	Ressourcen-Nr.	Betriebsstoffe	Volumen	Varianten	Auftragszeiten
	Durchlaufzeit	Kennwerte	Dichte		Energie
	Priorität		Schwerpunkt		Qualität
	Pufferplätze				
	Verfahrens-Nr.				
	Produktintelligenz				

Im Folgenden wird ein auf der Tabelle 3-2 basierendes Daten- und Schnittstellenmodell (DSM) vorgestellt, welches im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Das DSM bildet nur die zur Lösung des Automatisierungsproblems erforderlichen Informationen ab und beinhaltet zudem noch Echtzeiteigenschaften bzw. die zyklische Datenübertragung. Dies ist erforderlich, wenn das Produkt und der Prozess (Fertigungszellen und Maschinen) innerhalb einer vernetzten dezentralen Steuerungs- bzw. Regelungsstruktur miteinander kommunizieren, sowie interagieren müssen. Zudem muss aufgrund von begrenzter Rechen- und Speicherkapazität eine plattformunabhängige Verfügbarkeit der produktspezifischen Daten gewährleistet werden. Motiviert aus der Teilnehmerdefinition für die Off- und On-Board PINT nach McFARLANE in [MGWH13], werden diese im Folgenden zur Spezifikation der Schnittstellen verwendet. Das Bild 3-2 zeigt den prinzipiellen Aufbau des DSM. Die Produkt-Prozess-Schnittstelle (PPS) definiert alle relevanten Daten, deren exakten Austauschzeitpunkt, die Austauschrichtung und falls erforderlich die zyklische Übertragung zwischen dem Produkt und dem Prozess.

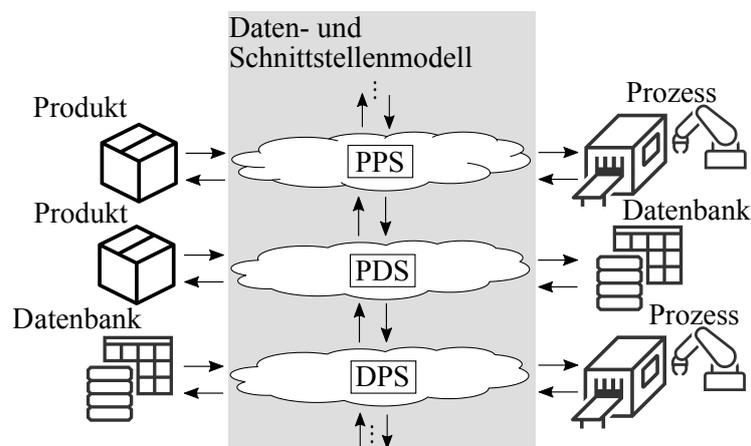


Bild 3-2: Definition der Schnittstellen zwischen dem Produkt, dem Prozess und der Datenbank im DSM

Die Granularität der PPS ist skalierbar, bspw. können die Beziehungen zwischen einem Produkt und einer zum Prozess gehörigen Fertigungszelle oder Maschine abgebildet werden. Analog gilt dies für die Produkt-Datenbank-Schnittstelle (PDS) und die Datenbank-Prozess-Schnittstelle (DPS).

In der Tabelle 3-3 wird beispielhaft eine detaillierte Form des DSM bzw. dessen Schnittstellen gezeigt. Die dargestellte PPS beinhaltet die Kommunikation zwischen dem intelligenten Produkt und dem Prozess. Innerhalb der angedeuteten Datenstruktur sind neben einer Identifikationsnummer (PPS.ID), auch der Datentyp, die Art der Kommunikation und deren Richtung dargestellt. Zudem erfolgte eine Unterteilung in die Produkt-Prozess-, Produkt-Datenbank- und Datenbank-Prozess-Schnittstelle. Für den unidirektionalen Datenaustausch werden die Symbole \leftarrow und \rightarrow verwendet. Eine bidirektionale Kommunikation ist durch das Symbol \rightleftarrows gekennzeichnet.

Tabelle 3-3: Beispielhafte Definition der möglichen Schnittstellen zwischen dem Produkt, dem Prozess und der Datenbank als Daten- und Schnittstellenmodell

Produkt-Prozess Schnittstelle (PPS)				
Daten	Typ	Wert	Kommunikation	Richtung
PPS.ID	INT	15	P_v^\uparrow	\rightarrow
PPS.Data1	REAL	22,3	$t_k = 1 \text{ s für } P_v^\cup$	\rightleftarrows
PPS.Data2	INT	33	P_v^\downarrow	\leftarrow
PPS.Data3	BOOL	FALSE	P_v^\uparrow	\leftarrow
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$\uparrow \downarrow$				
Produkt-Datenbank Schnittstelle (PDS)				
Daten	Typ	Wert	Kommunikation	Richtung
PDS.ID	INT	125	$t_k = 0, 1 \text{ s für } P_v^\cup$	\rightarrow
PDS.Data1	BOOL	TRUE	P_v^\downarrow	\leftarrow
PDS.Data2	INT	696	P_v^\downarrow	\leftarrow
PDS.Data3	BOOL	FALSE	P_v^\uparrow	\leftarrow
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$\uparrow \downarrow$				
Datenbank-Prozess Schnittstelle (DPS)				
Daten	Typ	Wert	Kommunikation	Richtung
DPS.ID	INT	86	P_v^\uparrow	\rightarrow
DPS.Data1	REAL	22,3	$t_k = 10 \text{ s für } P_v^\cup$	\rightleftarrows
DPS.Data2	INT	2	P_v^\downarrow	\leftarrow
DPS.Data3	BOOL	TRUE	P_v^\uparrow	\rightarrow
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

Im Sinne der Automation von produktgesteuerten flexiblen Fertigungsprozessen, welche ausführlich im nachfolgenden Kapiteln 4 und 5 beschrieben wird, sind ebenfalls die Übergabzeitpunkte der Produktkommunikation bzw. die Definition der Interaktion während einer wertschöpfenden Tätigkeit am Werkstück essenziell. Startet die Übertragung der Daten bspw. vor dem Beginn einer wertschöpfenden Tätigkeit bzw. eines Transportes ist diese mit einem \uparrow gekennzeichnet.

Erfolgt eine zyklische Kommunikation mit dem intelligenten Produkt während der wertschöpfenden Tätigkeit bzw. eines Transportes, ist diese durch \cup und unter Angabe des Kommunikationsintervalls dargestellt. Dies könnten bspw. Informationen sein, die durch im intelligenten Produkt integrierte Sensorik zur Verfügung gestellt werden. Daten, die am Ende eines Fertigungszyklus übertragen werden, sind durch \downarrow markiert. Neben der eigentlichen Verfügbarkeit von Daten ist die zeitliche Trigger aller Daten zum richtigen Zeitpunkt ein weiteres entscheidendes Kriterium, auf das in Kapitel 5.2.2 aus Sicht der dezentralen Rekonfiguration von Regelkreisen detailliert eingegangen wird. Zusammenfassend bilden die PPS, PDS und DPS ein Daten- und Schnittstellenmodell, welches als Grundlage für alle Konzepte in den nachfolgenden Kapiteln dient.

Ergänzend sei angemerkt, dass die Definition des DSM losgelöst von der tatsächlichen plattformabhängigen physikalischen Implementierung festgelegt wurde, d.h. wie beispielsweise ein RFID-Transponder ausgelesen und dessen Informationen über ein Feldbussystem übertragen werden. Die technische Realisierung des DSM kann bspw. auf Basis von mehreren unterschiedlichen Kommunikationsstandards- und Protokollen wie z.B. der *Open Platform Communications - Unified Architecture* (OPC-UA) erfolgen. OPC-UA und dessen neuste geplante echtzeitfähige Erweiterung durch zeit-sensitive Vernetzung (*engl. time sensitive networking*) ist ein Kommunikationsprotokoll der OPC-Foundation für die hersteller- und plattformunabhängige verteilte Maschine-zu-Maschine Kommunikation [DLM09; SP16]. Hierbei handelt es sich um ein hochperformantes, objektorientiertes Protokoll, welches, in Abhängigkeit der Komplexität, skalierbare Daten- und Informationsmodelle ermöglicht. Für weiterführende Informationen wird auf die folgende Literatur [DLM09; SBS15; PMD⁺14; Kol15; SP16] verwiesen.

3.5 Fazit und Zusammenfassung

Innerhalb dieses Kapitels wurden zunächst Schlüsseltechnologien für die Produktidentifikation wie bspw. RFID oder Barcode vorgestellt. Darauf aufbauend wurden die Definitionen der Produktintelligenz nach McFARLANE, KÄRKKÄINEN und VENTÄ diskutiert. Für eine systematische Auswahl der PINT hinsichtlich der Integration innerhalb flexibler und rekonfigurierbarer Fertigungssysteme wurden die Ansätze zur Spezifikation von MEYER et al., McFARLANE et al. und OSTGATHE zu einem dreidimensionalen Klassifizierungsmodell zusammengeführt. Hierdurch ist es möglich die PINT hinsichtlich ihrer Fähigkeiten, Entscheidungslokalität und dem Intelligenzträger zu differenzieren bzw. zu vergleichen. Zuletzt wurde auf Basis der von OSTGATHE vorgestellten Informationsstruktur ein vereinfachtes Daten- und Schnittstellenmodell entwickelt, welches im Folgenden für die Anwendung innerhalb der produkttoleranten vernetzten Steuer- und Regelung von Maschinen und Fertigungszellen verwendet wird.

4 Produktgesteuerte flexible Fertigungsautomation

Derzeit existieren eine Vielzahl von Literaturquellen⁹, die sich mit der flexiblen und/oder produktbasierten Automation von Fertigungsprozessen, d.h. mit der Flexibilisierung und/oder mit der Integration von intelligenten Produkten in die Automatisierung beschäftigen.

Nach der Erläuterung des Stands der Wissenschaft und Technik erfolgt in diesem Kapitel die Abgrenzung und Zielsetzung dieser Arbeit. Zudem wird die Topologie eines produktgesteuerten flexiblen Fertigungsprozesses aufgezeigt. Abschließend werden erstmals die Begriffe Produktbedürfnis und Produkttoleranz sowie die Anforderungen an ein produkttolerantes System definiert.

4.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Der folgende Abschnitt beschreibt den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik der produktgesteuerten flexiblen Fertigungsautomation.

OSTGATHE und ZAEH zeigten und untersuchten in [Ost12], [OZ13] sowie in [ZO09] die Integration von intelligenten Produkten der Klasse 2 (vgl. Tabelle 3-1) in einer Modellfabrik zur Fertigung von Getrieben. Hierbei wurde die effiziente Handhabung eines hochvariantenreichen Produktionsprogramms in einem hochautomatisierten Umfeld mittels eines Systems zur produktabhängigen Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage entwickelt. Die Basis hierfür lieferte ein Datenmodell für adaptive Produktionssysteme, welches sämtliche Daten, die für die Steuerung von Abläufen relevant sind, abbildet. Zudem wurde in [Ost12] ein wissensbasiertes System zum autonomen Störungsmanagement sowie eine Organisationsstruktur für eine auftragsbezogene Produktion gezeigt.

In [CKPT10] stellten CHEMNITZ et al. das Forschungsprojekt Selbstorganisierende Produktion (SOPRO) vor, welches mit skalierbaren Intelligenzen, sogenannten Process-eGrains, selbstorganisierende Strukturen in der industriellen Produktion ermöglicht. Alle Produkte und Ressourcen sind mit Process-eGrains ausgestattet, um mit anderen Teilnehmern im Produktions-Netzwerk zu verhandeln und unabhängig von der Leitebene die Fertigungsabläufe zu beeinflussen. Hierbei handelt es sich um miniaturisierte und kostengünstige Funksensorknoten mit einer autarken Energieversorgung. Die Systeme sind über eine eigene Recheneinheit in der Lage, Informationen dezentral zu erfassen, zu verarbeiten, zu speichern und untereinander zu kommunizieren. Dies repräsentiert ein Produkt mit einer Intelligenz der Klasse 4 (vgl. Tabelle 3-1). Zudem erläuterten UHLMANN et al. in [UHK13] das intelligente Agentensystem des Projektes SOPRO, welches zur Steuerung und Koordination entwickelt wurde.

Die Verknüpfung von RFID-Technologien mit Agentensystemen wurde auch von McFARLANE et al. in [MSC⁺03] gezeigt. Hierbei wurde RFID-Technik in ein rechnergestütztes

⁹Im deutschsprachigen Raum sind unter den Begriffen produktbasierte oder produktgesteuerte Fertigung die meisten Quellen zu finden, während im internationalen Umfeld die Begriffe *product-based*, *product-driven* oder *flexible manufacturing control* zielführend sind.

Fertigungssystem integriert. Ein softwarebasierter Auftrags- und Produktagent wird jedem physischen Produkt mit einem RFID-Transponder zugeordnet und steuert die Ablaufplanung in dem Produktionssystem.

Auf der Hannovermesse 2014 zeigte das Deutsche Forschungszentrum für künstliche Intelligenz aus Kaiserslautern in Zusammenarbeit mit einigen Industriepartnern einen Industrie 4.0 Demonstrator SmartFactory^{KL}. Hierbei wurde gezeigt wie sich Produkte mit einem eigenen Gedächtnis völlig autonom durch die unterschiedlichen Fertigungszellen bewegen, ohne das zwischen den einzelnen Stationen eine Querkommunikation stattfand. Jedes Produkt verfügte über einen eigenen RFID-Transponder, der zu Beginn des Produktlebenszyklus mit wichtigen prozess- und produktbezogenen Daten versehen wurde [WG15].

GAHEM et al. präsentierten in [GB09] ein Konzept für eine intelligente produktgetriebene Fertigungssteuerung, die aus einem Auto-ID-System mit RFID-Technologie, verteilten Agentensystemen und einer auf neuronalen Netzen basierenden Auftragsabwicklung besteht.

Die Autoren PANJAITAN und FREY stellten in [PF06] ein produktgetriebenes Steuerungskonzept auf Basis der RFID-Technologie vor, welches am Beispiel einer Bohrstation ereignisdiskret modelliert und demonstriert wurde. Es wurde gezeigt, wie sich die Ablaufsteuerung der Bohrstation flexibel an die unterschiedlichen Produktvarianten angepasst hat.

PANNEQUIN et al. untersuchten in [PMT09] die Performanz einer produktgesteuerten Fertigung am Beispiel von Produktionslinien aus der Automobilindustrie. Hierbei wurden vier Fertigungslinien untersucht, die zentral gesteuert, produktgesteuert ohne Autonomie und produktgesteuert mit Autonomie betrachtet wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass ein produktbasierter Steuerungsansatz in Nennfertigungssituationen eine Kombination der guten Leistungsfähigkeit eines zentralen Steuerungsansatzes mit der Anpassungsfähigkeit und Robustheit einer verteilten Steuerung darstellt. Aus dem Benchmark ging ebenfalls hervor, dass die Robustheit des produktabhängigen Systems hauptsächlich von den dezentralen Entscheidungsverfahren abhängt. Hierfür wurden zwei produktorientierte Steuerungskonzepte unter verschiedenen Störeinflüssen verglichen. Der Vergleich zeigte, dass im Steuerungskonzept bei dem nur die Produktattribute berücksichtigt wurden, eine höhere Anfälligkeit gegenüber Störungen vorliegt. Im Gegensatz dazu weißt das Steuerungskonzept bei dem sowohl die Produktattribute als auch dezentrale Informationen, wie Ressourcenzustand, Lagerbestände oder aktuelle Betriebsbedingungen berücksichtigt wurde, eine bessere Stabilität gegenüber Störeinflüssen auf. Autonomie und Intelligenz in der dezentralen Entscheidungsfindung sind somit für die produktbasierte Steuerung sehr wichtige Komponenten.

In [SLZ10] publizierten SEITZ et al. einen flexiblen Ansatz für eine produktbasierte Fertigung über ein digitales Produktgedächtnis, um minimale Losgrößen und eine reduzierte Produkteinführungszeit zu ermöglichen. Zur Integration von neuen Daten in den Produktspeicher wurde eine Sensorintegrationsplattform entwickelt, die eine einheitliche Schnittstelle für die heterogene Sensorinfrastruktur schafft. Der Produktspeicher fordert pro-aktiv neue Daten über die Integrationsplattform an, wobei diese mit der Fertigungssteuerung gekoppelt ist. Hierdurch ist der Produktspeicher in der Lage, die Umwelt zu erfassen und die Steuerung der eigenen Produktion zu beeinflussen.

Im Sonderforschungsbereich 653 "Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus" wurden die Ziele verfolgt, die physikalische Trennung zwischen Bauteilen und die damit verknüpften Informationen aufzuheben [Ost12]. Durch geeignete Materialien oder Sensorelemente ermöglicht die gentellige Technologie Information aus der Umwelt (z.B. Temperaturen oder wirkende Kräfte) zu erfassen, zu verarbeiten und inhärent auf dem Bauteil zu speichern. Die Information verbleiben während des Herstellungsprozesses und der Nutzungsphase über den gesamten Lebenszyklus erhalten und können an nachfolgende Produktgenerationen weitergegeben werden. Des Weiteren wurde im Rahmen des SFB 653 ein Ansatz für eine bauteilgetriebene Fertigung durch eine dynamische Reihenfolgebildung von Montage- und den zugehörigen Versorgungsaufträgen durch dezentrale Kommunikation entwickelt. Im Fokus stand jedoch nicht die Berücksichtigung von bauteilspezifischen Informationen und Zuständen für die Adaption von Produktionsabläufen [Ost12].

Am Beispiel eines Bohrprozesses zeigten KRUGER et al. eine Agenten-Architektur für die adaptive Steuerung und Optimierung eines Fertigungsprozesses [KSHN11]. Die Architektur beinhaltet das Lernen, die flexible rationale Entscheidungsfindung durch die Integration von heterogenen Algorithmen (d.h. neuronale Netzwerke und genetische Algorithmen) aus den Feldern des maschinellen Lernens, des Data Mining und der Statistik.

SVENSON und DANIELSON präsentierten in [SD15] einen Multi-Agenten Steuerungsansatz für eine flexible und robuste Fertigung. Hierbei wird die Steuerungsstrategie in einer Beschreibungssprache definiert und mit geringem zeitlichen Aufwand Multi-Agenten-Systeme zur Steuerung der Fertigung automatisch generiert. Der Generator ist zudem in der Lage das generierte Agenten-System direkt in IEC 61131-3 SPS-Steuerungscode zur Verwendung auf SPS-Systemen zu exportieren. Dadurch werden keine zusätzlichen Experten für die SPS-Programmierung benötigt und der Implementierungsaufwand wird reduziert. Des Weiteren sehen die Autoren in dem Ansatz das Potenzial für individuelle Kleinserienfertigung den Steuerungscode der Fertigung schnell und kostengünstig anpassen zu können.

Auf Basis eines Multi-Agenten-Systems zeigten VOOS und WANGMANAOPITUK in [VW13] ein flexibel automatisiertes Mikroproduktionssystem inklusive der benötigten mobilen Transportroboter. Zum einen wurden stationäre Produktionsmaschinen und mobile Transportroboter im Agentenkonzept integriert, um sich in Echtzeit an variierende Produktionsprozesse anzupassen. Neben dieser verteilten flexiblen Systemstruktur wurde auch das Automatisierungssystem, bestehend aus dem Manufacturing Execution System und der Fertigungssteuerung, in einem verteilten Multi-Agenten-System entworfen. Erste Simulationsergebnisse zeigen, dass sich das vorgeschlagene Konzept für die flexible und verteilte Automatisierung von Mikroproduktionssystemen eignet.

In [PMD⁺14] zeigten PANTFÖRDER et al. einen agentenbasierten *MyJoghurt* Industrie 4.0-Demonstrator welcher die dynamische Anpassung von verteilten, vernetzten und intelligenten Produktionsanlagen am Beispiel einer kundenspezifischen Joghurtproduktion ermöglicht. Hierbei wird exemplarisch die informationstechnische Kopplung und Vernetzung räumlich getrennter Produktionsanlagen demonstriert. Die Anzahl der teilnehmenden Anlagen im Verbund ist dynamisch und skalierbar. Bei der Vernetzung werden nicht nur Anlagen berücksichtigt, die zur Herstellung und Verpackung des Joghurts an einem Standort dienen, sondern auch Gerätehersteller, Hersteller von Verpackungen sowie die Fabrikanten von Joghurtzusätzen wie z.B. verschiedene Obstsorten [PMD⁺14].

Basierend auf integrierten RFID-Transpondern innerhalb einer Garnspule zeigen SAGGIOMO et. al in [SGG16] die Vernetzung zwischen intelligentem Halbzeug und einer Webmaschine. Auf dem Transponder werden wichtige Prozessparameter, wie bspw. die Position von Garninhomogenitäten gespeichert, wodurch die Webmaschine in der Lage ist, adaptiv die Drehzahl der Spule herabzusetzen, um ein Reißen des Garns und somit eine Unterbrechung des Webprozesses zu verhindern. Zudem wurde in Abhängigkeit der jeweiligen Garnspule bzw. den unterschiedlichen Garneigenschaften eine Optimierung der Webprozessparameter zur Vereinfachung der Maschineneinrichtung auf einer SPS implementiert.

Der Fokus des aktuellen Forschungsprojektes *RoboFill 4.0* liegt auf einer format- und losgrößenflexiblen Produktion von kundenindividuellen Getränken, die eine Produktionsmenge von wenigen Flaschen bis hin zum Unikat erlauben würde [BBGV16]. Hierfür soll ein adaptierbares und flexibel erweiterbares Abfüll- und Materialflusskonzept in Form einer dezentralen Steuerungsarchitektur entwickelt werden. Grundlegend soll dies über ein Multi-Agentensystem realisiert werden, bei dem jede relevante Fertigungskomponente ein intelligentes, kommunizierendes und zielgerichtet handelndes Objekt darstellt [BBGV16].

Im Folgenden wird ein Fazit aus den vorherigen Kapitel bzw. dem Stand der Wissenschaft und Technik gezogen. Zudem erfolgt eine Abgrenzung dieser Arbeit und die Definition der Ziele.

4.2 Fazit und Abgrenzung zum Stand der Wissenschaft und Technik

Zur systematischen Abgrenzung dieser Arbeit vom im Abschnitt 4.1 erläuterten Stand der Wissenschaft und Technik, zeigt das Bild 4-1 eine Literaturmengendarstellung.

Die Grundlagen dieser Arbeit beruhen im Wesentlichen auf fünf zum Teil eng miteinander verbundenen Themenbereichen, wovon drei Gebiete schon in den vorherigen Kapitel 2 und 3 detailliert erläutert wurden. Es handelt sich hierbei um: 1. Produktintelligenz, 2. Flexible und rekonfigurierbare Fertigungssysteme (FMS und RMS), 3. Fertigungsplanung, 4. Dezentralisierung, Vernetzung und Agentensysteme sowie 5. Steuerung und Regelung hybrider dynamischer Systeme. Die Inhalte der Themenbereiche 3. und 5. werden in den Kapiteln 6 und 5 detailliert erläutert.

Schnittmenge ①: Themenbereich 1. und 4.

Alle in ① und zum Teil in Abschnitt 4.1 beschriebenen Ansätze zur produktgesteuerten Automation von Fertigungsprozessen haben die Gemeinsamkeit, dass sie ausschließlich die aufgabenbezogenen und steuerungstechnischen Aspekte betrachten. Konkret wurde gezeigt, wie auf Basis von verteilten Agentensystemen und intelligenten Produkten, Fertigungsprozesse realisiert und untersucht werden. Nicht betrachtet wurden hingegen die Auswirkung von variierenden produktspezifischen Eigenschaften, Anforderungen sowie Losgrößen auf die **ereignisdiskrete** und **kontinuierliche**, d.h. hybride Systemdynamik der vernetzten dezentralen Fertigungszellen bzw. Maschinen. Des Weiteren wurde nicht gezeigt, wie eine **systematische produktbasierte steuerungs- und regelungstechnische Integration** erfolgt.

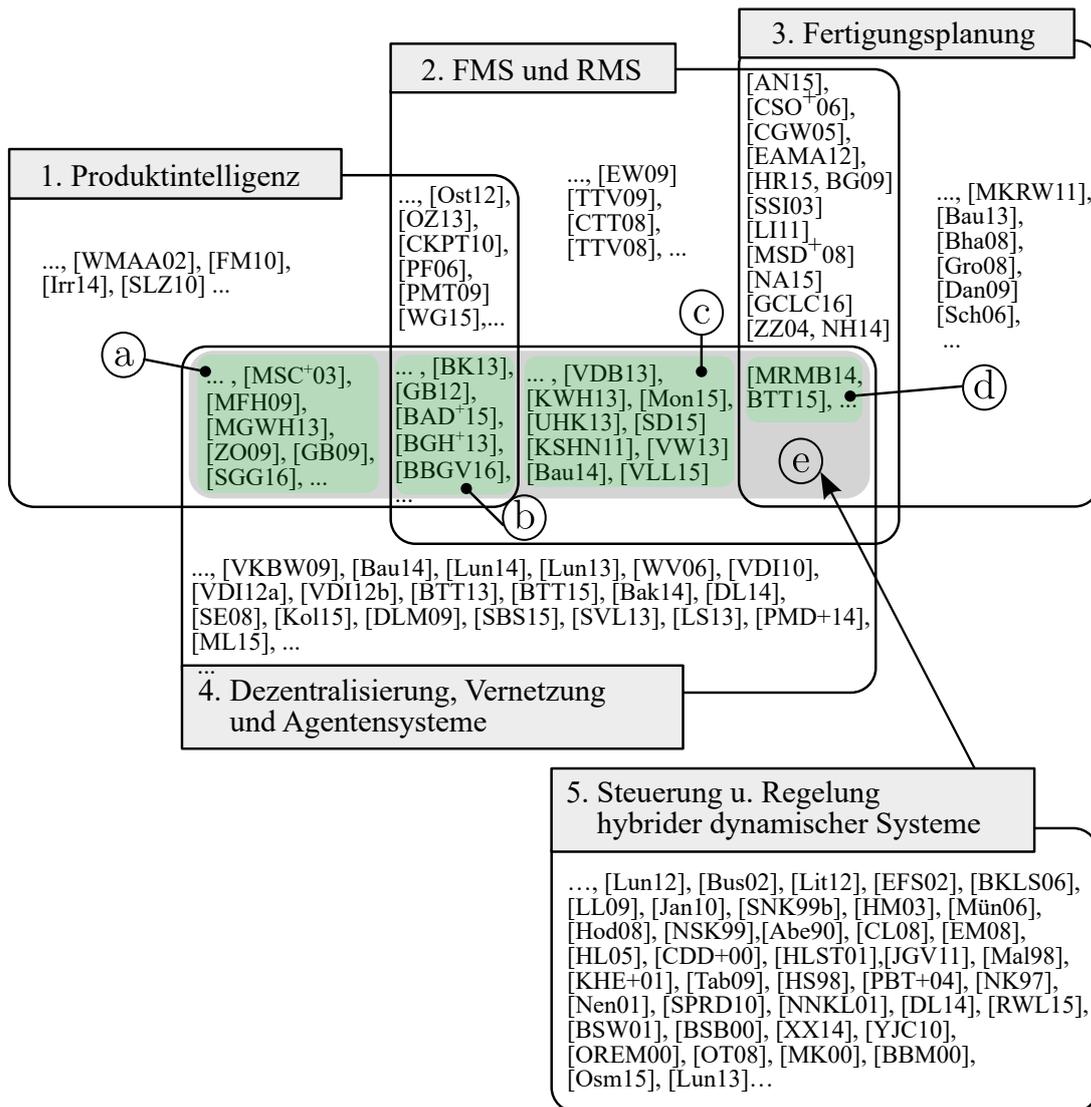


Bild 4-1: Literaturmengen zum Stand der Wissenschaft und Technik

Grundlegend hierfür ist eine **spezifizierte Interaktion** bzw. **Kommunikation** zwischen intelligentem Produkt und der FZ bzw. dessen Maschinen, die derzeit noch nicht definiert wurde. Darauf basierend müssen in kürzester Zeit Entscheidungen getroffen und umgesetzt werden, die das dynamische Verhalten einer Maschine oder Fertigungszelle maßgeblich beeinflussen. In diesem Kontext sind **dezentrale rekonfigurierbare Steuerungs- und Regelungskonzepte** erforderlich, die es ermöglichen auf unterschiedliche **Produktvarianten** mit verschiedenen Anforderungen, physikalischen **Eigenschaften** und/oder **variierenden Losgrößen** flexibel und autonom zu reagieren. Hierfür muss ein getriggertes Kommunikations- bzw. Interaktionsablauf zwischen dem intelligenten Produkt und der Maschine sichergestellt werden, d.h. es muss jedem Beteiligten klar sein, welche Informationen zu welchem Zeitpunkt und in welcher Qualität zur Verfügung stehen müssen. Basierend auf dem produktabhängigen und dezentral rekonfigurierbaren Steuerungs- und Regelungskonzept für flexible Fertigungsstationen, ist es möglich, den bisherigen Stand der Wissenschaft und Technik um ein bis dato fehlendes Element zu ergänzen.

Schnittmenge ⑥: Themenbereich 1., 2. und 4.

Neben den konkreten Forschungsergebnissen aus dem Abschnitt 4.1 wird in [BK13; GB12; BAD⁺15; BGH⁺13; VDB13; KWH13; Mon15; UHK13] und [BGH⁺13] die zukünftige Notwendigkeit bzw. Vision von intelligenten, vernetzten, flexiblen und rekonfigurierbaren Fertigungssystemen für die Realisierung von CPPS beschrieben. In den VDI-Richtlinien Agentensysteme in der Automatisierungstechnik werden konkret die Grundlagen [VDI10], die Entwicklung [VDI12a] und die Anwendung [VDI12b] von agentenbasierten Systemen erläutert, allerdings wurde nicht die Fragestellung zum **technologischen Entwurf** sowie der **Realisierung von verteilten Steuerungs- und Regelungsstrukturen** für die **produktgesteuerte** und flexible Fertigung behandelt. Aus dem zukünftigen Bedarf und dem bereits erläuterten Stand der Wissenschaft und Technik ist es daher zielführend einen **Entwurfsleitfaden** für die Lösung dieses Sachverhaltes zu erarbeiten.

Schnittmenge ③: Themenbereich 2. und 4.

Aus dem Abschnitt 4.1 und ③ geht hervor, dass sich die Autoren einig sind, dass für die Realisierung von FMS und RMS vernetzte und dezentrale Automatisierungsansätze erforderlich sind. Im Allgemeinen wird die Lösung bzw. der Entwurf solcher Automatisierungssysteme eher konzeptionell und maximal bis hin zur steuerungstechnischen Realisierung betrachtet [VKBW09; BK13]. Um Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit zu gewährleisten, insbesondere wenn sich Maschinen individuell auf variierende Produkte einstellen müssen, ist es zielführend auch die regelungstechnischen bzw. dynamischen Aspekte einer Maschine mitzubetrachten.

Schnittmenge ④: Themenbereich 2. und 3.

Aufgrund der Tatsache, dass in zukünftigen Fertigungsszenarien zunehmend mehr **Auftragsfertigung von kundenspezifischen Varianten** bzw. Produkten mit **geringen Losgrößen** erfolgt, wird der Wertschöpfungsprozess durch eine konkrete Kundenbestellung ausgelöst [Ost12]. Der folgende Herstellungsprozess erfolgt auf Basis der auftragspezifischen Kundeninformationen, auf den dieser jedoch keinen Einfluss hat [Ost12]. Infolgedessen steigen mit der **Variantenvielfalt** auch die **produktbezogenen Auftrags- und Logistikinformationen**. Zur Handhabung dieser Informationen werden die **Produkte** bzw. deren **Werkstückträger intelligenter** gestaltet. Viele statische bzw. globale Ansätze für die Fertigungsplanung, die zum Teil in den Literaturquellen des 3. Themenbereichs beschrieben sind, können mit dem durch die PINT verursachten Wandel in der Informationsverfügbarkeit nicht umgehen. Zudem verfügen sie nicht über die Möglichkeit, dass sich bspw. ein **intelligenter WT** neben der produktbasierten Steuer- und Regelung der Maschinen zusätzlich **aktiv an der Fertigungsplanung** beteiligt. Hierdurch würde zuvor gewonnene Flexibilität bei der Produktionsplanung verloren gehen. Daraus folgt, dass keine Kundenänderungen während des Fertigungsprozesses und produktspezifische Ressourcenbeschränkungen sowie Auslastung einzelner Maschinen berücksichtigt werden können. Die in ④ gezeigten Literaturquellen und der Stand der Wissenschaft und Technik in Kapitel 6 zeigen dynamische Verfahren zur Fertigungsplanung, allerdings berücksichtigt keines der vorgestellten Verfahren die in ③ und ⑥ festgestellte Notwendigkeit bzw. Integration von intelligenten Produkten innerhalb flexibler Fertigungssysteme. Hierbei können bspw. eine produktspezifische Priorität oder Eigenschaften nicht berücksichtigt werden, die auf einem WT gespeichert wurden.

Schnittmenge ⑤: Integration des 5. Themenbereiches

Mangels geeigneter Beschreibungsformen für die Integration von intelligenten Produkten innerhalb der vernetzten dezentralen Steuerungs- und Regelungsstrukturen mit potenziell hybrider Systemdynamik ist es zielführend einen Ansatz aus dem 5. Themenfeld zu adaptieren bzw. zu ergänzen. Dadurch ist es möglich die in ①, ② und ③ beschriebene Problematik darzustellen, systematisch zu entwerfen und untersuchen zu können.

Zur vollständigen Formulierung der Zielsetzung ist neben dem identifizierten Handlungsbedarf die System- und Zellentopologie eines produktgesteuerten flexiblen Fertigungsprozess erforderlich, die im Folgenden erläutert wird.

4.3 System- und Zellentopologie produktgesteuerter flexibler Fertigungsprozesse

Auf Basis der in Abschnitt 2.1.1 und Bild 2-1 nach ELMARAGHY et al. definierten Hierarchieebenen, wird im Folgenden die System- und Zellentopologie (vgl. Ebenen ①, ② und ③ in Bild 2-1) für einen produktgesteuerten flexiblen Fertigungsprozess definiert. Das Bild 4-2 zeigt die System-, Zellen- und Maschinentopologie eines zellenbasierten produktgesteuerten Fertigungsprozesses. Diese Topologie verfügt in unterschiedlichen Produktionsebenen über die Änderung der Fähigkeiten, Rekonfigurierbarkeit und Flexibilität (siehe Abschnitt 2.1.1). Im Fokus eines jeden Fertigungsprozesses steht die Herstellung einer endlichen Menge von Teilen oder Produkten P_ν ($\nu \in \mathbb{N}$). Diese können gemäß der im Abschnitt 3.2 gezeigten Definitionen und Klassifizierungen (siehe Abschnitt 3.3) selbst eine Intelligenz aufweisen oder über einen intelligenten WT befördert werden.

In Abhängigkeit ihrer Fähigkeiten können die intelligenten WT uni- und bidirektionale Kommunikations- sowie Interaktionsbeziehungen mit Warteschlangen, anderen intelligenten WT, Fertigungszellen und Maschinen aufbauen. Zudem liegen infolge des Fertigungsprozesses physikalische und logistische Kopplungen mit anderen Produktionsteilnehmern wie bspw. den Maschinen oder Transportmechanismen vor. Die zellenbasierte Fertigung besteht aus einer endlichen Menge ($N \in \mathbb{N}$) an Fertigungszellen Σ_N , die über unterschiedliche Fähigkeiten verfügen und in verschiedenen prozess-, logistik und produktspezifischen Anordnungen innerhalb eines Produktionsprozesses genutzt werden. Alle FZs, Warteschlangensysteme sowie intelligenten WT sind über ein ganzheitliches Kommunikationsnetzwerk, welches die Grundlage für das in Abschnitt 3.4 definierte Daten- und Schnittstellenmodell liefert, miteinander vernetzt.

Zu Beginn eines jeden Fertigungsprozesses von Produkten findet eine Bestellung durch den Kunden statt. Eine besondere Herausforderung für die Produktion sind hierbei Bestellungen von Produkten die eine Varianz und/oder schwankende Losgrößen bis hin zur Ein-Stück-Fertigung aufweisen [Ost12; BK13; EW09]. Nach dem Eingang der Kundenbestellung befinden sich die Aufträge im Bestellmanagement welches gleichzeitig auch für die Generation der Produktintelligenz, wie bspw. die Programmierung eines RFID-Tags mit auftrags- und produktspezifischen Daten oder die Parametrisierung eines intelligenten Werkstückträgers zuständig ist. Gemeinsam bilden diese Funktionen die Eingangswarteschlange innerhalb der zellenbasierten Fertigungstopologie. Des Weiteren wird innerhalb des Bestellmanagements eine dynamische Planung der flexiblen Produktion d.h.

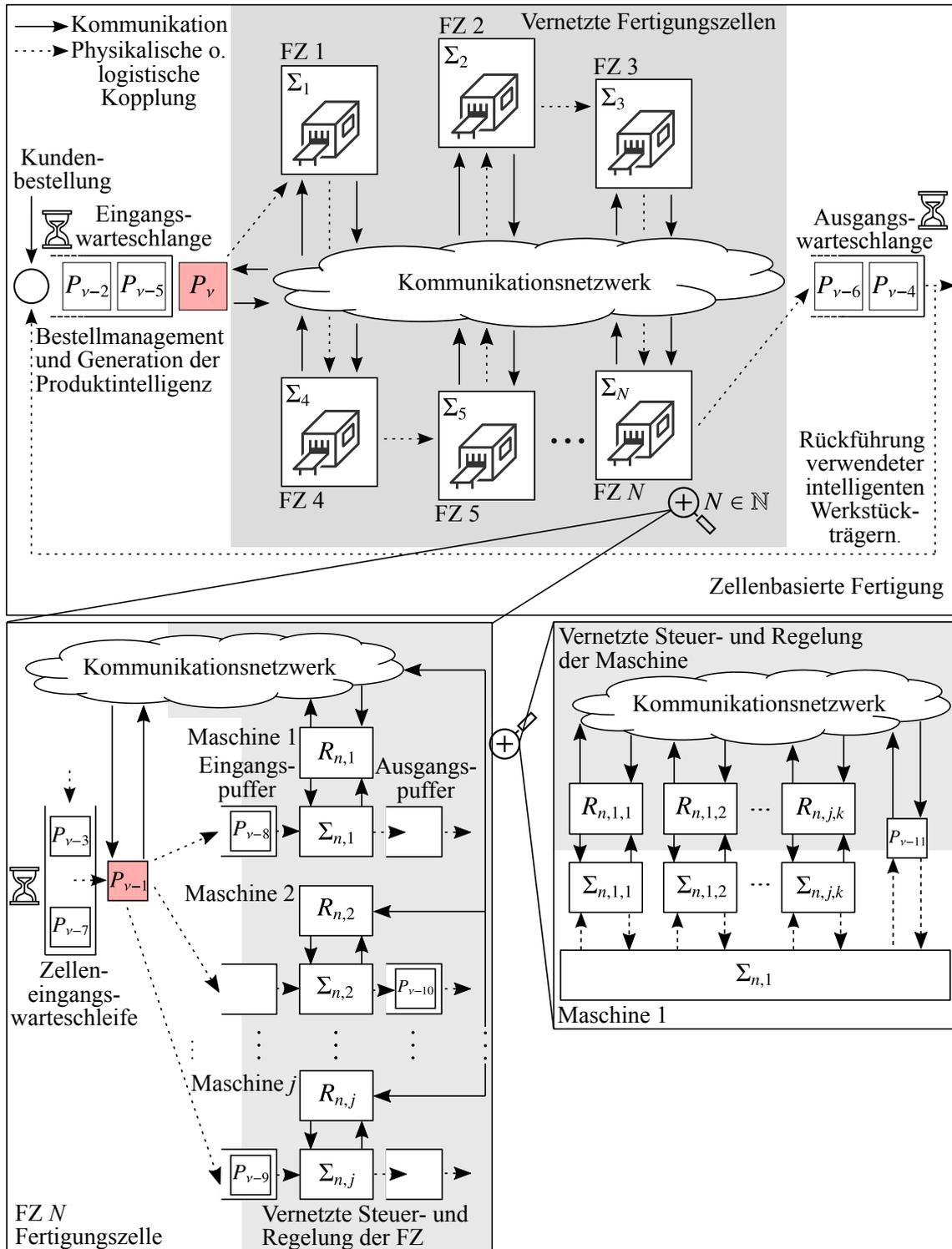


Bild 4-2: System- und Zellentopologie produktgesteuerter flexibler Fertigungsprozesse

der Zellen und Maschinen, die zur Herstellung eines Produktes P_v benötigt werden, vorgenommen. Hierfür sind dynamische Planungsalgorithmen erforderlich, die eine Vielzahl von variierenden auftrags- und produktspezifischen Größen, wie bspw. eine Produktpriorität, unterschiedliche physikalische Produkteigenschaften (siehe Tabelle 3-3 und 3-2), schwankende Losgrößen u.v.m zur Laufzeit und in Abhängigkeit der Zellenauslastung berücksichtigen können. Einige Grundlagen, eine detaillierte Übersicht zum Stand der Technik und ein neuartiger Lösungsansatz dieses Sachverhaltes werden in Kapitel 6 näher erläutert. Am Ende des Fertigungsprozesses befindet sich die Ausgangswarteschlange. Innerhalb dieser muss im Falle eines intelligenten WT die Trennung/Reduzierung der Produktintelligenz vom Werkstück durchgeführt werden. Dies bedeutet, dass im Falle einer Trennung der intelligente Werkstückträger an die Eingangswarteschlange zur Neuparametrisierung zurück geführt wird. Bei der Reduzierung wird beispielsweise der intelligente Produktträger der Eingangswarteschlange zugeführt und das Werkstück wird mit einer niedrigeren Produktintelligenz bspw. einem Barcode oder einfachen RFID-Tag versehen, welcher über den gesamten Produktlebenszyklus erhalten bleibt.

Im unteren Teil des Bildes 4-2 ist exemplarisch die zellinterne Topologie der Fertigungszelle FZ N dargestellt. Analog zum gesamten Fertigungsprozess sind ebenfalls alle Teilnehmer, d.h. die Maschinen, intelligenten Produkte und Warteschlangen mittels eines Kommunikationsnetzwerkes verbunden. Jede FZ hat eine Eingangswarteschlange, deren Kapazität immer von den zellenspezifischen Fähigkeiten abhängt und somit variieren kann. Die Auswahlstrategie und Zuordnung der Produkte auf die einzelnen Maschinen wird detailliert in Kapitel 6 erläutert. In diesem Beispiel sind die dargestellten Maschinen in einer Parallelstruktur angeordnet, dies könnte ebenso eine sequenzielle Abarbeitung bzw. eine Mischform aus beiden sein. Jede zellinterne Maschine j ($j \in \mathbb{N}$) hat einen Ein- und Ausgangspuffer, indem intelligente Produkte bzw. Produktträger mit Werkstück vor sowie nach dem wertschöpfenden Fertigungsschritt warten können. Die Regelung bzw. Steuerung jeder Maschine erfolgt über $R_{n,j}$, wobei n ($n \subset N \in \mathbb{N}$) jede Maschine eindeutig einer Zelle N zuordnet. Der Maschinenregler $R_{n,j}$ kontrolliert die dynamischen Eigenschaften der physikalischen Maschineneinheit $\Sigma_{n,j}$, der ebenfalls aus einzelnen vernetzten Maschinenteilreglern $R_{n,j,k}$ ($k \in \mathbb{N}$) sowie gekoppelten Maschinenteilsystemen $\Sigma_{n,j,k}$ bestehen kann. Ein Beispiel für eine Maschine könnte eine Abfüllstation zur Herstellung unterschiedlicher Flüssigkeitsrezepte sein. Im Zuge der physikalischen Kopplung zwischen Produkt P_v und der Maschineneinheit $\Sigma_{n,j}$ bzw. Maschinenteilsysteme $\Sigma_{n,j,k}$ sowie der Interaktion infolge der Regel- und Steuerstrategien zwischen Maschinenteilregler $R_{n,j,k}$ und Maschinenteilsystem $\Sigma_{n,j,k}$ kann sich eine hybride Systemdynamik einstellen [BT15; BET15]. Infolgedessen sollten die Systembetrachtungen der ereignisdiskreten und kontinuierlichen Maschinendynamik immer gemeinsam analysiert werden. Falls keine nennenswerte Beeinflussung bzw. Kopplung vorliegt, kann die Betrachtungsweise immer noch vereinfacht werden. Neben der eigentlichen Maschinenteilsteuer- und -regelung beinhaltet $R_{n,j,k}$ zudem eine neuartige Funktionseinheit, die es ermöglicht die Dynamik des Systems in Abhängigkeit der vom intelligenten Produkt vorgegebenen Eigenschaften gezielt zu beeinflussen. Dieser Sachverhalt wird detailliert im Kapitel 5 erläutert.

Auf Basis der vorgestellten Systemtopologie eines zellenbasierten produktgesteuerten flexiblen Produktionsprozesses, den Kapiteln 2 und 3 sowie den Abschnitten 4.1 und 4.2 werden im Folgenden die wesentlichen Begriffsdefinitionen und Anforderungen dieser Arbeit formuliert.

4.4 Produktbedürfnis- und Produkttoleranz

In diesem Abschnitt werden die Begriffe Produktbedürfnis und Produkttoleranz definiert, die basierend auf den Inhalten der Abschnitte 3.1 bis 4 verfasst wurden und die Rolle des intelligenten Produktes in der flexiblen Automation widerspiegeln. Abschließend werden Anforderungen an ein produkttolerantes System beschrieben.

4.4.1 Begriffsdefinitionen

Neben den Planungsaspekten der Fertigung wie bspw. einer minimalen Durchlaufzeit können Produkte auch Bedürfnisse hinsichtlich der Dynamik oder Güte einer an ihm durchgeführten wertschöpfenden Tätigkeit oder einer Transportbewegung aufweisen.

Hierzu könnte z.B. eine bestimmte Regelstrategie, eine Umschaltung des Reglerkonzeptes oder die Erfüllung einer angestrebten Regelgüte zählen. Des Weiteren haben die variierenden Produkte und ihre Eigenschaften eine Rückkopplung auf die Prozesse. Dieser Sachverhalt wird in der folgenden Definition 2 beschrieben. Basierend auf der in Bild 4-2 dargestellten Topologie werden nachfolgend die Begriffe Produktbedürfnis und Produkttoleranz definiert.

Definition 2 *Produktbedürfnis*

Unter einem Produktbedürfnis sind die zu erfüllenden Anforderungen eines intelligenten Produktes P_v , welches die Eigenschaften nach den in Abschnitt 3.2 diskutierten Definitionen und/oder Merkmale der Klassifizierung aus Abschnitt 3.3 aufweist, zu verstehen. Hierzu gehören alle ereignisdiskreten sowie dynamischen Eigenschaften, die ein System wie bspw. eine FZ Σ_N oder Maschine $\Sigma_{n,j}$, in Form einer wertschöpfenden Tätigkeit oder eines Transportes erfüllen muss. Die Bedürfnisse werden der Maschine $R_{n,j}$ bzw. dem Maschinenteilsystem $R_{n,j,k}$ im Sinne der klassifizierten Produktintelligenz (siehe Abschnitt 3.3) über das Daten- und Schnittstellenmodell (siehe Abschnitt 3.4) zur Verfügung gestellt.

Zur Erfüllung eines Produktbedürfnisses muss ein System die Fähigkeit der Produkttoleranz aufweisen, die wie folgt definiert ist.

Definition 3 *Produkttoleranz*

Ein System bspw. eine Maschine oder Fertigungszelle (vgl. Bild 4-2) ist produkttolerant, wenn es die Fähigkeit aufweist, die Bedürfnisse eines intelligenten Produktes P_v nach Definition 2 bzw. dessen Varianz ΔP_v in Form von festgelegten Prozessen, Abläufen und Diensten quasi-dezentral (gemäß Definition 1) zu erfüllen. Dies gilt ausschließlich, für das im Designprozess berücksichtigte Produktspektrum welches auf einem System, einer Maschine oder Fertigungszelle produziert werden soll. Des Weiteren muss das System über eine geeignete Topologie (siehe Kapitel 2) und die erforderliche Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit (siehe Abschnitt 2.1) verfügen.

Auf Basis der Definitionen 2 und 3 werden im nächsten Abschnitt die Anforderungen an ein produkttolerantes System aufgezeigt.

4.4.2 Anforderungen an ein produkttolerantes System

Zur Erfüllung variierender Produktbedürfnisse muss ein produkttolerantes System beispielsweise in der Lage sein, die Funktionalität dynamisch anzupassen und sich flexibel auf unterschiedliche Fertigungsbedingungen infolge der gestiegenen Produktkomplexität einzustellen. Die folgenden Anforderungen A_{PT} beziehen sich auf das gesamte in Abschnitt 4.4.1 definierte System und werden auf Basis der Anforderungen an Cyberphysischen Produktionssystemen [BK13; VDB13; Mon15; LS13], flexiblen Fertigungssystemen [EW09; TTV09; TTV08], Agentensystemen [VLL15; VDI10; VDI12a; VDI12b] sowie Produktintelligenz [Ost12; MGWH13; BST16] erarbeitet.

Anforderung $A_{PT,1}$: Generelle Systemvoraussetzungen

Das System bzw. die Fertigungszelle **muss** die Möglichkeit bieten eine **mechanische** und **informationstechnische Integration** von **intelligenten Produkten** vornehmen zu können.

Erläuterung:

Generell muss im Designprozess einer neuen Fertigungsanlage bzw. bei der Erweiterung einer Bestandsanlage die Machbarkeit eines produkttoleranten System überprüft werden. Für die erfolgreiche Integration von intelligenten Produkten P_v (gemäß Abschnitt 3.2 und 3.3) in eine vernetzte Steuerungs- und Regelungsstruktur (siehe Bild 4-2) im Sinne eines produkttoleranten Systems, wird detailliertes Wissen über die Struktur der Fertigung benötigt. Im Fokus der Analyse eines bestehenden Fertigungssystems bzw. bei der Konzeptionierung einer Neuentwicklung stehen die benötigten Produktionsschritte. Hierfür werden wiederum Ressourcen in Form von Fertigungszellen und Maschinen benötigt, die hinsichtlich ihrer Fähigkeiten bzw. Operationen, physikalische sowie logistische Kopplungen, der Informationsschnittstellen und der gewünschten Produktvarianz ΔP_v betrachtet werden müssen [VLL15]. Falls erforderlich, können zur Abbildung und Analyse ganzheitliche funktionale Modelle verwendet werden, welche alle notwendigen Fachdisziplin übergreifenden Aspekte des produkttoleranten Systems sowie des zu fertigenden Produktes beinhalten [VDB13; VLL15].

Anforderung $A_{PT,2}$: Spezifikation der Flexibilität

Das System bzw. die Fertigungszelle **muss** infolge seiner **Flexibilität** fähig sein ein **definiertes Produktspektrum zu fertigen**.

Erläuterung:

Die zunehmende Individualisierung von Produkten führt zu einem Anstieg der benötigten variantenspezifischen Komponenten oder Fertigungsschritte. Eine gestiegene Produktkomplexität impliziert, dass sich Produktions-, Fertigungs- und Logistikeigenschaften häufiger während des laufenden Herstellungsprozesses ändern müssen [Ost12]. Hierfür bilden intelligente Produkte einen wesentlichen Bestandteil zur Realisierung der erforderlichen Flexibilität (siehe Abschnitt 2.1) von Fertigungsprozessen [MFH09; EW09; TTV09]. In Abhängigkeit der Produktvarianz ΔP_v ist es deshalb erforderlich die Dimensionen, Attribute und Ebenen der Flexibilität

beispielsweise für die Fertigung verschiedener Produktvarianten zu ermitteln (vgl. Tabelle 2-1, 2-2 und 2-3).

Anforderung $A_{PT,3}$: Ressourcen- und Datenverfügbarkeit

Das System bzw. die Fertigungszelle **muss** in der Lage sein die erforderliche **dezentrale Rechenkapazität** und die benötigten **Informationen** zur Verfügung zu stellen.

Erläuterung:

Infolge der zunehmenden Vernetzung und Dezentralisierung basiert die Flexibilität auf schnellen lokalen Entscheidungen, die prozessnah und echtzeitfähig zur Laufzeit getroffen werden [Ost12; BK13]. Für diese Entscheidungen benötigen die Steuer- und Regelungen des vernetzten Reglers $R_{n,j}$ bzw. $R_{n,j,k}$ Daten und Informationen über den (Teil-)Prozess $\Sigma_{n,j}$ bzw. $\Sigma_{n,j,k}$ und insbesondere über das herzustellende Produkt P_v sowie dessen Varianz ΔP_v .

Anforderung $A_{PT,4}$: Infrastruktur und Lokalität der Produktintelligenz

Das System bzw. die Fertigungszelle **muss** die **informationstechnische Infrastruktur** zur **Realisierung** der **Produktintelligenz** zur Verfügung stellen.

Erläuterung:

Nahezu zeitgleich zur Erstellung des Daten- und Schnittstellenmodells ist es erforderlich eine, zum Automatisierungsproblem passende Produktintelligenz auszuwählen. Basierend auf dem in Abschnitt 3.3 vorgestellten dreidimensionalen Klassifikationsmodell sind Analysen und Vergleiche unterschiedlichster Realisierungsmöglichkeiten möglich. Bewertungskriterien hierfür sind beispielsweise die zur Verfügung stehende informationstechnische Infrastruktur (bspw. Netzwerk und Datenbanken), die Rechenperformanz der lokalen Steuer- und Regelungen $R_{n,j}$ bzw. $R_{n,j,k}$, bestehende Auto-ID Systeme, Prozesswissen sowie Kosten.

Anforderung $A_{PT,5}$: Realisierung der Produktintelligenz

Das intelligente Produkt **muss** alle zur **mechanischen** und **informationstechnischen Integration** erforderlichen **Eigenschaften** sowie **Fähigkeiten** erfüllen.

Erläuterung:

Nachdem eine geeignete Realisierungsmöglichkeit der Produktintelligenz gefunden wurde, ist die technische Entwicklung des intelligenten Produktes oder Produktträgers P_v erforderlich, welche in drei Bereiche aufgeteilt werden kann: die Produktfähigkeiten, die Entscheidungslokalität und den Intelligenzträger. Die benötigten Fähigkeiten implizieren konkrete Schlüsseltechnologien, die bereits in Kapitel 3 diskutiert wurden. Diese sind immer in Abhängigkeit des betrachteten Automatisierungsproblems und der Topologie des Fertigungsprozesses zu wählen. Eng verbunden mit den Fähigkeiten ist die Entscheidungslokalität und Integration der Intelligenz im Produkt selbst bzw. in einem Werkstückträger. Zur konkreten Realisierung müssen somit immer die physikalischen Schnittstellen des intelligenten

Produktes, Prozessbedingungen und Kommunikationsmöglichkeiten berücksichtigt werden.

Anforderung $A_{PT,6}$: Kommunikations- und Interaktionstrategien

Das System bzw. die Fertigungszelle und das intelligente Produkt **müssen** über eine **geeignete Kommunikations- und Interaktionstrategie** fähig sein miteinander zu **interagieren**.

Erläuterung:

In Abhängigkeit der in Abschnitt 3.3 klassifizierten Produktintelligenz und der Informations- bzw. Datenstruktur aus dem Abschnitt 3.4 ist es erforderlich den Ablauf der Kommunikation bzw. der Interaktion zwischen intelligentem Produkt und der Maschine, der Station oder der Fertigungszelle sicherzustellen. Dies ist grundlegend für die technische Realisierung der im Abschnitt 2.1 definierten Flexibilität von Fertigungssystemen [EW09; TTV09; BT15], da diese informationsbezogenen Fähigkeiten auf prozessabhängigen Ereignissen basieren.

Anforderung $A_{PT,7}$: Produkttolerante Rekonfiguration

Der **Steuerungs- und Regelungsalgorithmus** einer **Maschine** oder **Fertigungszelle** muss fähig sein auf die **Bedürfnisse** eines **Produktes** und dessen **Varianz individuell reagieren** zu können.

Erläuterung:

Aufbauend auf der in $A_{PT,2}$ zur ermittelnden Spezifikation der Flexibilität muss diese in Form von Steuerungs- und Regelungsalgorithmen $R_{n,j}$ bzw. $R_{n,j,k}$ umgesetzt werden. Konkret bedeutet dies, wie die Algorithmen $R_{n,j}$ der Maschinen $\Sigma_{n,j}$ bspw. auf eine Produktvarianz ΔP_v in Form einer Massenänderung reagieren sollen. Falls für die produktabhängige Analyse der Systeme unter $A_{PT,1}$ funktionale ganzheitliche dynamische Modelle verwendet wurden, können diese idealerweise für den modellbasierten Entwurf eines produkttoleranten Steuerungs- und Regelungsalgorithmus $R_{n,j}$ genutzt werden. Auf Basis des modellbasierten Entwurfes, wie bspw. von Buss in [Bus02] beschrieben oder mit einem geeigneten Prüfstand ist es möglich die produkttoleranten Steuerungs- und Regelungsalgorithmus $R_{n,j}$ zu entwerfen und synthetisieren. Ziel hierbei ist immer die Entwicklung von zuverlässigen und flexiblen Algorithmen sein, dessen Realisierung auf echtzeitfähigen eingebetteten Systemen wie z.B. einem Mikrocontroller oder einer SPS möglich ist.

Anforderung $A_{PT,8}$: Produktabhängige Fertigungsplanung

Das **System** bzw. **eine Fertigungszelle** muss durch ein **dynamisches Planungsverfahren** befähigt sein, eine **kundenspezifische Einzelfertigung** mit **hoher Varianz** zu **organisieren**.

Erläuterung:

Infolge der zunehmenden Herstellung von kundenspezifischen Produkten nehmen die Losgrößen bis hin zur Ein-Stück-Fertigung ab und die Anzahl der abzuwickelnden Aufträge zu [Ost12]. Für die Fertigung eines breiten und anspruchsvollen

Produktspektrums werden hochintegrierte, flexible Maschinen und Anlagen benötigt, die kurze Durchlaufzeiten, eine hohe Termintreue und schnelle Reaktionszeiten auf sich wandelnde Fertigungsbedingungen besitzen [Ost12; BK13]. Hierfür ist eine dynamische Fertigungsplanung, erforderlich welche eng mit dem Auftragsmanagement zusammenarbeitet, um möglichst wenig Lagerbestände vorzuhalten und die Produktion hinsichtlich geringer Rüstzeiten bei gleichzeitig vielen unterschiedlichen Produktvarianten zu gewährleisten. Innerhalb der dynamischen Planung sollten ebenfalls etwaige Ressourcenbeschränkungen, d.h. die Fähigkeiten der einzelnen Maschinen oder Fertigungszellen bzw. der aktueller Status wie bspw. erforderliche Werkzeugwechsel oder berücksichtigt werden. Des Weiteren ist es bei einer kundenspezifischen Einzelfertigung mit hoher Varianz erforderlich, dem Produkt eine dynamische Priorität zu zuweisen, die es ermöglicht, bereits in der Herstellung befindliche dringende Aufträge schnell durch die Fertigung zu schleusen.

Aus den obigen Anforderungen $A_{PT,1}$ bis $A_{PT,8}$ und Begriffsdefinitionen ergeben sich anwendungsspezifische Ziele, die im Folgenden spezifiziert werden. Zur Erfüllung der Ziele werden im Rahmen dieser Arbeit sukzessive neue Lösungen erarbeitet, angewendet und validiert.

4.5 Zielsetzung der Arbeit

Zusammenfassend werden die **wesentlichen Ziele** dieser Arbeit als Ergänzung des Standes der Wissenschaft und Technik wie folgt definiert:

- Entwicklung eines produkttoleranten Rekonfigurators, der als Erweiterung für die Maschinensteuer- und -regelung $R_{n,j}$ bzw. der Maschinenteilsysteme $R_{n,j,k}$ aufzufassen ist. Hierdurch ist es möglich die Maschinen- $\Sigma_{n,j}$ bzw. Maschinenteildynamik $\Sigma_{n,j,k}$ in Abhängigkeit der Produktvarianz ΔP_v im Sinne einer Ein-Stück-Fertigung anzupassen.
- Systematische vernetzte steuerungs- und regelungstechnische Integration von intelligenten Produkten P_v mittels des Daten- und Schnittstellenmodells unter Berücksichtigung der gestiegenen Produktvarianz ΔP_v .
- Entwicklung und Spezifikation einer Kommunikations- und Interaktionstrategie, die es dem intelligenten Produkt P_v in Abhängigkeit der jeweiligen Intelligenzklasse ermöglicht, mit den vernetzten Steuer- und Regelungen einer FZ ($R_{n,j}$, $R_{n,j,k}$) bzw. dessen Maschinen ($\Sigma_{n,j}$, $\Sigma_{n,j,k}$) zu agieren.
- Entwicklung eines Leitfadens für den systematischen Entwurf einer produkttoleranten Steuer- bzw. Regelung.
- Spezifizierte Integration intelligenter Produkte innerhalb einer dynamischen Produktionsplanung für zellenbasierte Fertigungssysteme.
- Entwicklung eines Verfahrens zur dynamischen Produktionsplanung von zellenbasierten Fertigungssystemen unter Berücksichtigung der PINT, den Produktbedürfnissen P_v und der Varianz ΔP_v . Zudem sollen schwankende Losgrößen L bis hin zur Ein-Stück-Fertigung, produktindividuelle Prioritäten $\rho(P_v)$, unbekannte Bestellzeitpunkte und die flexiblen Zelleneigenschaften berücksichtigt werden.

In den nachfolgenden Kapiteln werden sukzessive Lösungsbausteine zur Erfüllung der obigen Ziele erarbeitet. Hierfür erfolgen weitere Abgrenzungen sowie Fokussierungen zum Stand der Wissenschaft und Technik aus den jeweiligen Themengebieten separat in den folgenden Kapiteln.

4.6 Fazit und Zusammenfassung

Zunächst wurde auf Basis der Grundlagen aus den Kapiteln 2 und 3 der Stand der Wissenschaft und Technik der produktgesteuerten flexiblen Fertigungsautomatisierung erläutert. Diesbezüglich erfolgte eine Diskussion der an diese Arbeit angrenzenden Themengebiete: Produktintelligenz, flexible sowie rekonfigurierbare Fertigungssysteme, dynamische Fertigungsplanung, Dezentralisierung, Vernetzung, Agentensysteme und die Steuerung bzw. Regelung von hybriden dynamischen Systemen. Anschließend wurden die Ziele dieser Arbeit definiert und die Systemtopologie eines produktgesteuerten flexiblen Fertigungsprozesses erläutert. Zudem wurden die grundlegenden Begriffe des Produktbedürfnisses und der Produkttoleranz definiert. Abschließend erfolgte die Formulierung von acht wesentlichen Anforderungen an ein produkttolerantes System.

5 Steuerung und Regelung für produkttolerante Teilsysteme eines zellenbasierten Fertigungsprozesses

Im Abschnitt 4.3 bzw. in dem Bild 4-2 wurde bereits gezielt die Struktur einer vernetzten Steuer- und Regelung eines zellenbasierten Fertigungsprozesses mit intelligenten Produkten erläutert. Innerhalb dieser Struktur gibt es dynamische Systeme $\Sigma_{n,j}$ welche eine Maschine innerhalb der Fertigungszelle darstellen und von der jeweiligen Steuer- bzw. Regelung $R_{n,j}$ kontrolliert werden. Oftmals besteht die Gesamtheit einer Maschine wiederum aus mehreren gekoppelten dynamischen Teilsystemen $\Sigma_{n,j,k}$, die über vernetzte dezentrale Steuer- bzw. Regelungen $R_{n,j,k}$ kontrolliert werden. Zur Sicherstellung eines geforderten dynamischen Systemverhaltens ist ein enges Zusammenspiel zwischen der ereignisdiskreten Steuerung und der zeitkontinuierlichen Regelung einer Maschine erforderlich [BT15; BET15]. Dies gilt insbesondere, wenn die flexiblen Maschinen zur Fertigung von Produkten mit einer hohen Variantenvielfalt verwendet werden [BT15; BET15]. Hierfür ist oftmals eine Rekonfiguration innerhalb der Maschinensteuer- bzw. Regelung und/oder in der Maschinenperipherie in Abhängigkeit des zu fertigenden Produkts erforderlich [EW09; BT15; BET15].

Zur ganzheitlichen Beschreibung der Kopplungen zwischen ereignisdiskretem Steuerungsteil und zeitkontinuierlicher Regelung einer Maschine in Abhängigkeit von intelligenten Produkten mit hoher Variantenvielfalt bietet sich die Betrachtung als hybrides dynamisches System an. Im Folgenden wird erstmals im Rahmen dieser Arbeit gezeigt, wie eine hybride Steuer- bzw. Regelung befähigt wird, seine dynamischen Eigenschaften in Abhängigkeit von variierenden Produktbedürfnissen zu ändern.

5.1 Steuerung und Regelung hybrider dynamischer Systeme

Nach der Definition von Eigenschaften eines hybriden dynamischen Systems, werden ausgewählte Beschreibungsformen vorgestellt und miteinander hinsichtlich ihrer Eignung für eine produkttolerante Steuerungs- und Regelungstopologie verglichen.

5.1.1 Eigenschaften von hybriden dynamischen Systemen

In der Automatisierung findet prinzipiell eine Unterscheidung in kontinuierliche und ereignisdiskrete Systeme statt. Für die Lösung werden mathematische und systemtheoretische Methoden verwendet, die sich grundsätzlich unterscheiden [Lun12]. Während sich kontinuierliche Systeme durch algebraische Gleichungen und Differenzialgleichungen beschreiben lassen, existieren für ereignisdiskrete Systeme keine geschlossenen Ausdrücke für die Zustandsübergänge. In der Regel werden diese Systeme über umfangreiche Tabellen oder über Grafiken dargestellt [Lun12]. Oftmals wird in der Praxis nur die diskrete Betrachtungsebene gewählt, um nur die wichtigsten Elemente und Eigenschaften eines Prozesses abzubilden. In vielen automatisierungstechnischen Szenarien treten kontinuierliche und ereignisdiskrete Systemanteile gleichzeitig auf und keines von beiden darf unter

Berücksichtigung der Anforderungen vernachlässigt werden. Die Kombination aus beiden Teilsystemen wird als hybrides dynamisches System bezeichnet [Lun12; Bus02; Lit12; EFS02]. Zur Beschreibung der gesamten hybriden Systemdynamik werden die folgenden Größen für das ereignisdiskrete Teilsystem

v - ereignisdiskrete Eingangsgröße
 v_Q - ereignisdiskrete Koppelungsgröße
 z - ereignisdiskrete Zustandsgröße
 w - ereignisdiskrete Ausgangsgröße

und für das zeitkontinuierliche Teilsystem die Größen

u - zeitkontinuierliche Eingangsgröße
 u_I - zeitkontinuierliche Koppelungsgröße
 x - zeitkontinuierliche Zustandsgröße
 y - zeitkontinuierliche Ausgangsgröße

eingeführt. Das Bild 5-1 zeigt, wie die definierten Größen innerhalb des hybriden dynamischen Systems zusammenhängen. Neben den bereits definierten ereignisdiskreten und zeitkontinuierlichen Teilsystemen, sind zusätzlich die Schnittstellen Injektor und Quantisierer dargestellt, die zur Verbindung beider Systeme erforderlich sind [Lun12; BKLS06; LL09; Jan10]. Der Quantisierer bestimmt aus dem zeitkontinuierlichen Systemzustand x den aktuellen Wert der ereignisdiskreten Koppelungsgröße v_Q für das diskrete Teilsystem. Die umgekehrte Transformation vom ereignisdiskreten Systemzustand z in die zeitkontinuierliche Koppelungsgröße u_I des zeitkontinuierlichen Systems wird durch den Injektor durchgeführt [Lun12; BKLS06].

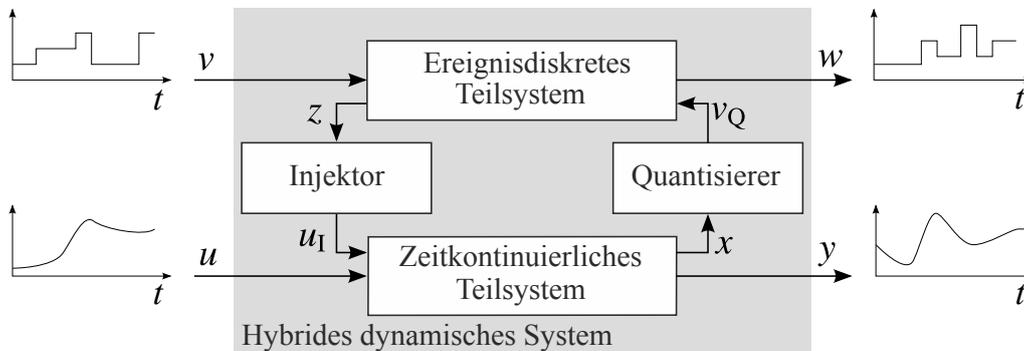


Bild 5-1: Schematischer Aufbau eines hybriden dynamischen Systems

Diese Darstellungsart kann direkt auf Systeme angewendet werden, deren hybrider Charakter sich bei einer hierarchischen Zerlegung des Systems offenbart [Lun12]. Nachfolgend werden die wichtigsten Eigenschaften eines hybriden Systems definiert, welches dem schematischen Aufbau in Bild 5-1 genügt.

Definition 4 *Hybrides dynamisches System (HDS) (in Anlehnung an [Bus02, S.6])*

Hybride dynamische Systeme sind durch stark verkoppelte zeitkontinuierliche und ereignisdiskrete Systemanteile gekennzeichnet, wobei deren dynamische Systemeigenschaften im Wesentlichen durch die Interaktion beider Aspekte geprägt sind.

Neben der eigentlichen Definition eines HDS werden in der Literatur oftmals hybride Phänomene erwähnt, welche die Art der Interaktion beschreiben [SNK99b; EFS02; HM03; Mün06; Hod08; Lun12]. Die folgende vereinfachte Definition differenziert in vier verschiedene hybride Phänomene einer eindimensionalen Zustandsgröße $x(t)$. Prinzipiell können diese Phänomene auch in einzelnen Zuständen eines Zustandsvektors auftreten und voneinander abhängig sein.

Definition 5 *Hybride Phänomene (nach [HM03; Hod08])*

- Beim **autonomen Umschalten** erreicht der kontinuierliche Zustand $x(t)$ den Umschaltzustand x_e , dabei wird das autonome Ereignis ausgelöst (siehe Bild 5-2 a). Deutlich zu erkennen ist, dass sich die Ableitungen vor \dot{x}^- und nach \dot{x}^+ dem Ereignis unterscheiden, allerdings bleibt der Verlauf der Zustandsgröße stetig.
- Zum Zeitpunkt t_e wird durch ein Steuersignal die Dynamik der Zustandsgröße $x(t)$ umgeschaltet (siehe Bild 5-2 b), wodurch für die Ableitung der Zustandsgröße $\dot{x}(t_e^-) \neq \dot{x}(t_e^+)$ gilt. Dieses Phänomen wird als **gesteuertes Umschalten** bezeichnet und führt zu einem stetigen Verlauf der Zustandsgröße $x(t)$.
- Das Bild 5-2 c) zeigt einen **autonomen Sprung** der Zustandsgröße $x(t)$, beim Erreichen des Zustandes $x(t) = x_e$. Die Zustandsgröße wird sprunghaft erhöht, was zu einer Unstetigkeit $x^- \neq x^+$ führt. Die Ableitung des Zustandes bleibt dabei stetig.
- Der von außen ausgelöste **gesteuerte Sprung** führt zum Zeitpunkt t_e zu einem Zustandssprung $\dot{x}(t_e^-) \neq \dot{x}(t_e^+)$ der Zustandsgröße $x(t)$. Die Ableitung der Zustandsgröße bleibt hierbei stetig (siehe Bild 5-2 d).

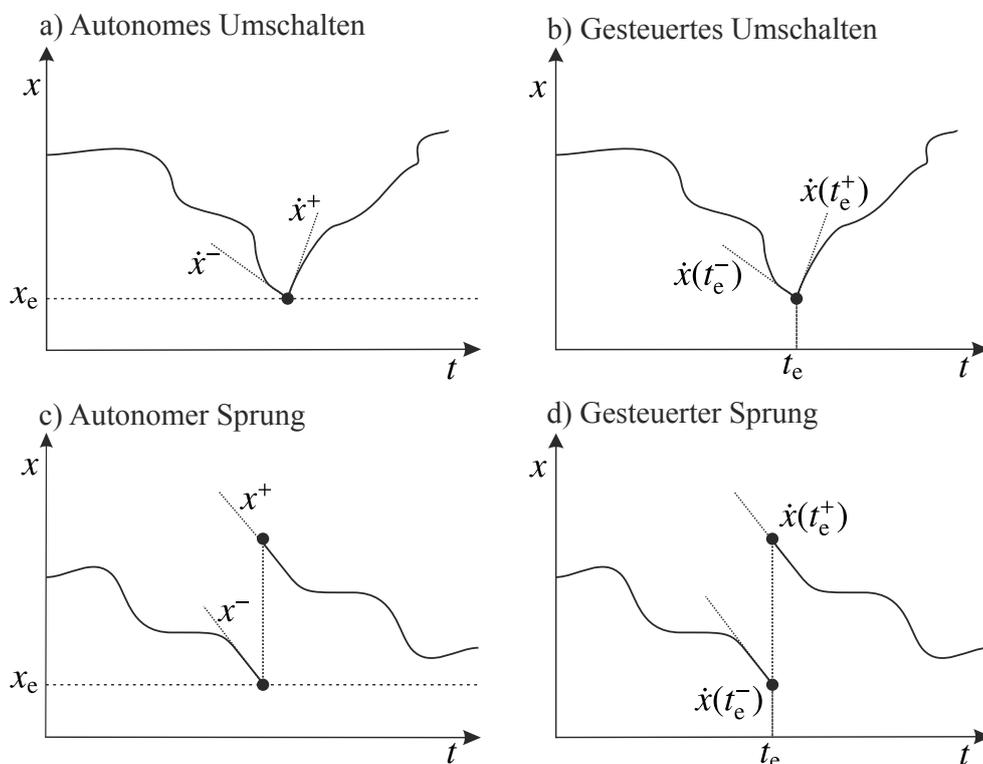


Bild 5-2: Hybride Phänomene (in Anlehnung an [Hod08, S.15])

Tritt mindestens eins oder eine beliebige Kombination aus diesen vier Phänomenen auf, so spricht man von einem hybriden System [HM03]. Im Folgenden werden Beschreibungsformen zur Berücksichtigung der hybriden Phänomene vorgestellt.

5.1.2 Beschreibungsformen von hybriden dynamischen Systemen

Zur Beschreibung von ereignisdiskreten Systemen haben sich im Bereich der Steuerungstechnik die Automaten [Lun09; Lit12], die PETRI-Netze [Abe90] und die Zustandsdiagramme (*engl. statechart*) [Lun09] etabliert [SNK99a]. Statecharts basieren auf einer hierarchischen Anordnung von Automatengraphen [SNK99a]. Zudem lassen sich PETRI-Netze durch die von SCHNABEL et al. in [SNK99a] gezeigte Konvertierung in Statecharts überführen. Dies ist von besonderem Interesse beim Einsatz von Simulationsumgebungen wie bspw. MATLAB mit der Toolbox Stafeflow. Für die Darstellung einer kontinuierlichen Systemdynamik haben sich die Zustandsraummodelle, insbesondere für die Reglersynthese, durchgesetzt [Föl13; Lun13].

Oftmals ist es erforderlich hybride Phänomene (gemäß Definition 5) innerhalb eines mathematischen Modells abzubilden. In der Literatur wird eine Vielzahl von Modellformen für hybride dynamische Systeme beschrieben [Bus02; EFS02; CL08; EM08; HL05; CDD⁺00; HM03; Hod08; HLST01; Jan10; JGV11; Lit12; LL09; Mal98; KHE⁺01; Tab09; HS98; PBT⁺04; SPRD10]. Viele der genannten Literaturquellen sind innerhalb des Schwerpunktprogramms: „Analyse und Synthese kontinuierlicher-diskreter Systeme“- KONDISK der Deutschen Forschungsgemeinschaft entstanden, welches der Entwicklung von Methoden der Modellierung, Analyse, Synthese, Simulation und Software-Werkzeug-Unterstützung für hybride Systeme diente [Bus02, S.2].

Zur Beschreibung der HDS, werden einzelne zeitgetriebene Systeme durch eine übergeordnete ereignisdiskrete Struktur zu einem hybriden dynamischen System miteinander verbunden [Hod08]. Hierfür wurde eine Vielzahl von Modellformen entwickelt, von denen nun fünf grundlegende Ansätze näher betrachtet und verglichen werden.

- Das **Netz-Zustands-Modell** (NZM) besteht aus einem steuerungsinterpretierten PETRI-Netz (SIPN) und einem erweiterten Zustandsraummodell (EZM). Im Vergleich zum klassischen PETRI-Netz, welches keine definierten Ein- und Ausgaben sowie kein definiertes Anfangsverhalten aufweist, sind beim SIPN die Transitionen als Eingänge und Plätze aus Ausgänge definiert [Lit12]. Aus diesem Grund ist das SIPN für die Beschreibung von Steuerungsproblemen in der Automatisierungstechnik von großer Bedeutung [Lit12]. Sobald die Systemtrajektorie des zeitkontinuierlichen Systems eine Schaltbedingung erfüllt, erzeugt die kontinuierlich-diskrete Schnittstelle ein Ereignis, damit die ereignisgetriebene Dynamik des PETRI-Netzes beeinflusst wird. Die diskret-kontinuierliche Schnittstelle bildet den aktuellen Zustand bzw. die Stellenbelegung des PETRI-Netzes über logische und algebraische Verknüpfungen in einem Vektor ab , der als zusätzliche Eingangsgröße im erweiterten Zustandsraummodell dient. Die Elemente des Vektors können hierbei boolesche oder reelle Werte annehmen [Hod08]. Vertiefende Informationen sind [NK97; NSK99; SNK99b; Nen01] zu entnehmen.
- **Mixed Logical Dynamical** (MLD) Systeme besitzen einen dynamischen und einen logischen Systemanteil, welche für die Namensbildung verantwortlich sind. Das

MLD-Modell wird üblicherweise in zeitdiskreter Form angegeben. Zur Abbildung eines hybriden Systemverhaltens wird die Zustandsdifferenzgleichung durch logische Variablen und einen Hilfszustand ergänzt. Über die logischen Variablen wird die rechte Seite der Zustandsdifferenzgleichung abhängig von den Zustands- und Eingangsgrößen mit einer Eins oder einer Null multipliziert. Das entstandene Gleichungssystem kann über die in [Hod08, S.18 ff.] beschriebenen Schritte in ein Ungleichungssystem überführt werden, welches mit den Beschränkungen für die Zustands- und Eingangsgrößen eine Vielzahl von Bedingungen zusammenfasst. Eine detaillierte Beschreibung ist in [Hod08; Bus02; Mün06] zu finden.

- **Stückweise affine Systeme (SAS)** sind im Vergleich zum NZM oder MLD-System sehr einfach definiert. Der oftmals zeitdiskrete Zustandsraum wird in Bereiche eingeteilt. Für jeden Bereich wird in Form einer Fallunterscheidung eine Gültigkeit formuliert, in der jeweils eine oder ein Satz von Zustandsdifferenzgleichungen die Dynamik des Systems bestimmt. Durch die affine Form der SAS eignen sich diese für die Approximation von hybriden Systemen durch mehrfache Linearisierung in unterschiedlichen Arbeitspunkten bzw. Bereichen. Informationen zur konkreten mathematischen Beschreibung sind [Mün06; Hod08; LL09] zu entnehmen.
- Die **hybriden Automaten (HA)**, die in [Lit12, S.390 ff.] näher beschrieben sind, basieren auf der Definition eines hybriden Zustandes. Hierbei wird jedem ereignisdiskreten Zustand genau ein zeitkontinuierliches Zustandsraummodell zugeordnet. Das zeitkontinuierliche Zustandsraummodell gilt genau so lange, wie sich der Automat im dazugehörigen diskreten Zustand befindet. Die kontinuierliche Dynamik verarbeitet ausschließlich kontinuierliche Ein- und Ausgangsgrößen, während die ereignisdiskreten Ein- und Ausgangsgrößen nur von den Zustandsübergängen des Automaten zugeordnet werden. Siehe hierfür auch [Lit12; LL09; Lun09].
- **Hybride PETRI-Netze (HPN)** bilden neben dem ereignisdiskreten auch den kontinuierlichen Dynamikteil über PETRI-Netze ab. Hierbei wird im kontinuierlichen Teil der Inhalt einer Marke durch eine reelle Zahl und die Transition durch eine reellwertige Markenflussrate beschrieben [Lit12]. Für die Kommunikation zwischen dem ereignisdiskreten und dem kontinuierlichen Netzteil wurden zusätzliche Kanten eingeführt, die eine gesamtheitliche Beschreibung als HPN ermöglichen [Lit12].

Nach der Kurzvorstellung von fünf ausgewählten Modellformen werden diese im Folgenden hinsichtlich wichtiger Eigenschaften in Tabelle 5-1 verglichen. Die Kriterien resultieren zum einen aus den bereits erwähnten Literaturquellen. Zum anderen wurden sie aus den Anforderungen $A_{PT,1}$ bis $A_{PT,8}$ (vgl. Abschnitt 4.4.2) und der **hierarchischen Systemtopologie** des zellenbasierten Fertigungsszenarios (siehe Abschnitt 4.3) abgeleitet. Für einen systematischen Entwurf in oftmals getrennten Domänen ist eine **Separation** in ereignisdiskrete und kontinuierliche Systembestandteile, die über definierte Schnittstellen miteinander gekoppelt sind, von enormer Bedeutung. Aus Sicht der Unterteilung in Maschinen und Maschinenteilsysteme ist die physikalische und kommunikative **Kopplung** der Systeme zu einem Gesamtsystem ebenfalls im Fokus der Betrachtungen. Für die Nachvollziehbarkeit und Anwendungsakzeptanz sollte der ereignisdiskrete sowie kontinuierliche **Datenfluss** intuitiv nachvollziehbar und die **Komplexität** der Modellierungsform nicht zu hoch sein. Die oftmals erforderliche Situation, Prozesse bzw. Fertigungsschritte in ihrer Abarbeitung zu parallelisieren, wird bei der Beschreibung von HDS und insbesondere bei ereignisdiskreten Systemen als **Nebenläufigkeit** bezeichnet.

Tabelle 5-1: Vergleich von Beschreibungsformen für HDS

Modellform	Separation	Hierarchie	Kopplung	Datenfluss	Komplexität	Nebenläufigkeit
NZM	●	●	●	●	●	●
MLD	○	○	○	○	○	○
SAS	◐	○	○	○	●	○
HA	◐	◐	◐	●	◐	○
HPN	●	●	●	◐	◐	●

Erfüllungsgrad: hoch ●, mittel ◐ und gering ○

Aus dem Vergleich in Tabelle 5-1 geht hervor, dass die PETRI-Netz basierten Beschreibungsformen, wie das NZM und HPN insgesamt den höchsten Erfüllungsgrad hinsichtlich der sechs Kriterien aufweisen. Zudem können über PETRI-Netz basierte Ansätze im Vergleich zu automatenbasierten Modellformen Nebenläufigkeiten und Synchronisationen abgebildet werden [SNK99b; SNK99a]. Dabei wird durch die Synchronisation, die Aktivierung bzw. Deaktivierung von parallelen Modellen ermöglicht [SNK99b; SNK99a]. Zudem werden PETRI-Netze seit Jahrzehnten innerhalb der Steuerungstechnik aufgrund ihrer anschaulichen Darstellung, hohen Transparenz, geringen strukturellen Komplexität und umfangreichen Analysemöglichkeiten verwendet [Abe90; NSK99; SNK99b; SNK99a].

Hieraus folgt, dass das MLD-System, das SAS und die HA nicht weiter für die Abbildung der Maschinendynamik mit einer produkttoleranten Steuer- und/oder Regelung in Betracht gezogen werden. Die beiden noch verbleibenden Ansätze basieren auf PETRI-Netzen, allerdings wird beim NZM das zeitkontinuierliche Teilsystem über ein erweitertes Zustandsraummodell abgebildet, welches eine etablierte Beschreibungsform darstellt [Lun12; Föll13]. Zudem lässt sich beim NZM der Datenfluss zwischen dem ereignisdiskreten und kontinuierlichen Teilsystem intuitiv nachvollziehen, weil zwei etablierte Modellierungsformen miteinander gekoppelt wurden. Dies spiegelt sich auch in der geringeren Komplexität des Ansatzes wider. Für alle nachfolgenden Betrachtungen wird somit die Beschreibungsform des Netz-Zustands-Modells gewählt.

Basierend auf dem NZM wird im Folgenden der Entwurf einer produkttoleranten Steuer- und Regelung eines hybriden dynamischen Systems beschrieben.

5.2 Produkttolerante Steuer- und Regelung

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung eines produkttoleranten Steuer- und Regelung auf Basis des NZM beschrieben. Weiterhin werden Rekonfigurationsstrategien in Abhängigkeit der Produktintelligenz vorgestellt.

5.2.1 Aufbau und Funktion der produkttoleranten Steuer- und Regelung

Das Bild 5-3 zeigt in Bezug auf die in Abschnitt 4.3 (siehe Bild 4-2) vorgestellte System- und Zellentopologie produktgesteuerter flexibler Fertigungsprozesse die Steuer- und Re-

geltopologie $R_{n,j}$ für eine Maschine j der FZ n dargestellt durch die Maschinenstrecke $\Sigma_{n,j}$. Die primäre Eingangsgröße für die in Bild 5-3 dargestellte online-rekonfigurierbare hybride Steuer- und Regelung bildet jeweils ein Produkt aus einer endliche Menge von Produkten P_v . Die eigentliche Logistik und Zuweisung der intelligenten Produkte auf die Maschinen wird in Kapitel 6 näher erläutert.

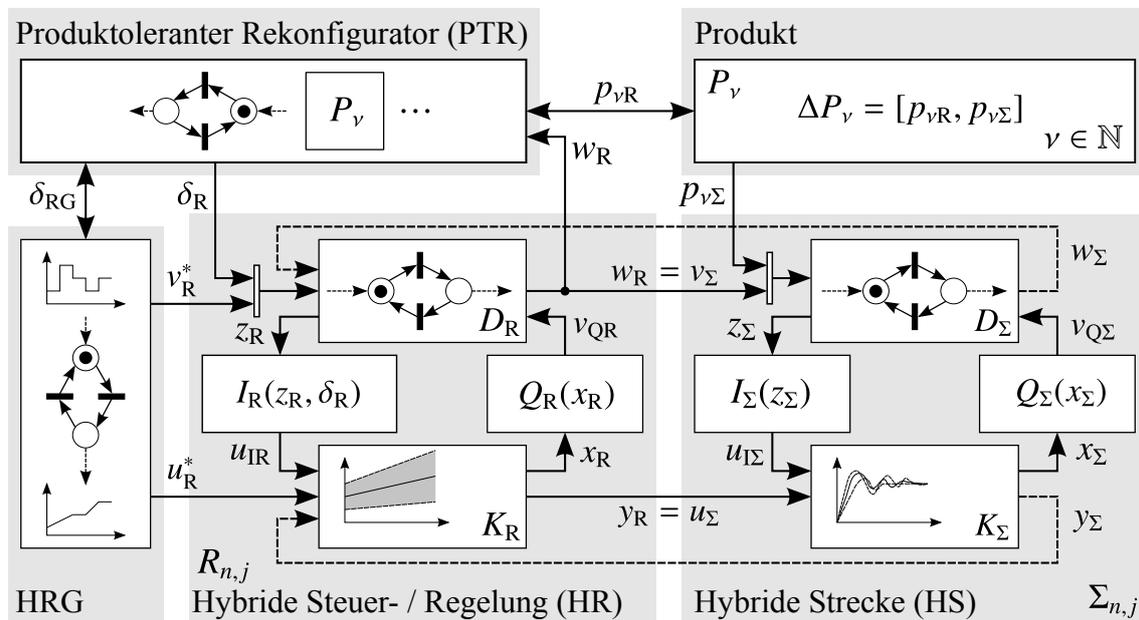


Bild 5-3: Topologie der hybriden produkttoleranten Steuer- und Regelung

Die hybride Steuer- bzw. Regelung (HR) und die hybride Strecke (HS) bestehen jeweils aus einem NZM. Durch Serienschaltung von HR und HS durch die Ausgänge $w_R = v_\Sigma$ bzw. $y_R = u_\Sigma$ entsteht eine hybride Steuerung [Nen01; Bus02]. Werden die Ausgangsgrößen y_Σ sowie w_Σ der HS auf den Eingang des HR zurück gekoppelt, handelt es sich um einen geschlossenen hybriden Regelkreis [Bus02]. Das NZM besteht aus vier Bestandteilen: dem kontinuierlichen erweiterten Zustandsraummodell (K_R , K_Σ), dem ereignisdiskreten Systemanteil dargestellt als SIPN (D_R , D_Σ), dem Injektor (I_R , I_Σ) und dem Quantisierer (Q_R , Q_Σ) [NK97; NSK99; Nen01]. Der Injektor erzeugt aus einer Ausgabefolge (z_R , z_Σ) des PETRI-Netzes eine zusätzliche kontinuierliche Eingangsgröße (u_{IR} , $u_{I\Sigma}$) für das EZM (K_R , K_Σ) [Lit12]. Über den Quantisierer werden die maßgeblichen Zustandsgrößen x_R , x_Σ auf eine ereignisdiskrete Eingabefolge (v_{QR} , $v_{Q\Sigma}$) des SIPN abgebildet [Lit12].

Nach Buss besteht eine hybride Steuer- bzw. Regelung zusätzlich aus einem hybriden Referenzgenerator (HRG), bei dem über die Sollgrößen u_R^* und v_R^* das Führungsverhalten vorgegeben werden kann [Bus02].

Im Folgenden wird die aus der Literatur bekannte hybride Steuer- und Regelung bestehend aus HRG, HR sowie HS zu einem produkttoleranten Regelkreis erweitert.

Beim einem produktgesteuerten Fertigungsprozess ist das zu fertigende Produkt selbst ein aktives Element innerhalb der Steuerung des eigenen Herstellungsprozesses. Dieser Grundgedanke wird bei der Maschinensteuer- und -regelung weiter verfolgt. Hierbei sind das Produkt P_v bzw. dessen unterschiedliche Varianten ΔP_v ein weiteres zu berücksichtigendes Element.

Jedes Produkt besitzt Bedürfnisse und physikalische Eigenschaften, die in Form des in Abschnitt 3.4 erläuterten DSM vorliegen. Aus regelungs- und steuerungstechnischer Sicht sind die Parameter und physikalischen Größen von besonderem Interesse, die einen direkten Einfluss auf die dynamischen Eigenschaften der Maschinenstrecke $\Sigma_{n,j}$ aufweisen. Zu diesen Parametern $p_{v\Sigma}$ gehören z.B. ein produktspezifisches Lastmoment oder eine Veränderung der Maschinenträgheitsmomente. Sofern diese Eigenschaften bekannt sind, wirken sie als direkte diskrete Eingangs- bzw. Störgröße der hybriden Strecke $\Sigma_{n,j}$, die in Form eines NZM modelliert ist. Parameter, die sich direkt auf die hybride Steuer- und Regelung bzw. deren Rekonfiguration auswirken, sind mit p_{vR} gekennzeichnet. Hierzu zählen z.B. eine eindeutige Identifikationsnummer, die Varianten- oder Werkstoffkennung, Angaben zur Produktmasse oder des Schwerpunktes sowie die räumlichen Produktabmessungen. Eine strikte Trennung der Parameter und physikalischen Größen in p_{vR} und $p_{v\Sigma}$ ist jedoch nicht immer möglich. Bei der Betrachtung einer produktindividuellen Masse kann diese einen direkten physikalischen Einfluss über $p_{v\Sigma}$ auf die Strecke $\Sigma_{n,j}$ aufweisen. Zudem ist es möglich, dass der Wert einer Produktmasse über p_{vR} die Grundlage für eine masseabhängige Rekonfiguration des hybriden Reglers $R_{n,j}$ bildet.

Der produkttolerante Rekonfigurator (PTR) ist in der Lage, über den Signal- und Parametersatz p_{vR} bidirektional mit einem Produkt P_v zu kommunizieren, sofern die Intelligenzklasse ≥ 2 gewählt wurde. Innerhalb des PTR, der dezentral für jede Maschine $\Sigma_{n,j}$ mit der dazugehörigen Steuer- bzw. Regelung $R_{n,j}$ appliziert ist, gilt das First-Come-First-Serve Prinzip bei der Abarbeitung von verschiedenen Produkten aus der Menge P_v . Allerdings erfolgt die Zuordnung zu den Fertigungszellen Σ_N und Maschinen $\Sigma_{n,j}$ mit anderen Verfahren, auf die im nachfolgenden Kapitel 6 näher eingegangen wird.

Auf Basis der gelesenen Produktdaten bzw. -eigenschaften kann der PTR im nächsten Schritt die Berechnung der Rekonfigurationsdaten und -parameter, wie bspw. ein neuer Proportionalbeiwert des Reglers oder eine angepasste Soll Drehzahltrajektorie, vornehmen. Nachdem die Parameter berechnet und auf ihre Gültigkeit überprüft wurden, erfolgt die eigentliche Rekonfiguration. Diese kann vor und/oder während des laufenden Prozesses bzw. Fertigungsschrittes durchgeführt werden. Der getriggerte Ablauf in Abhängigkeit unterschiedlicher Intelligenzklassen der Produkte wird detailliert im Abschnitt 5.2.2 beschrieben. Über das Signal δ_{RG} kommuniziert der PTR mit dem HRG und gibt dynamisch eine neue hybride Referenztrajektorie $h_G^{*T} = [v_R^* u_R^*]^T$ vor. Dies könnte z.B. im ereignisdiskreten Fall die Umschaltung des Betriebszustandes im HR sein oder für den kontinuierlichen Teil des hybriden Reglers eine Drehzahltrajektorie. Zur zeitlichen Triggerung des Gesamtsystems kommuniziert der Referenzgenerator ebenfalls mit dem PTR. Das Steuersignal δ_R dient zur eigentlichen Rekonfiguration des hybriden Reglers und beinhaltet die produktabhängigen Regelparameter. Für die Überwachung des Betriebszustandes wird der aktuelle Zustand w_R des HR an den PTR zurückgeführt.

Für eine zuverlässige Rekonfiguration des hybriden Steuer- und Regelkreises einer Fertigungsmaschine sind definierte Abläufe innerhalb des PTR erforderlich. Diese werden im Folgenden in Abhängigkeit der in Abschnitt 3.3 klassifizierten Produktintelligenz erläutert.

5.2.2 Produktgetriggerte Kommunikation, Rekonfiguration und Interaktion

Basierend auf den zuvor erläuterten produkttoleranten Steuer- und Regeltopologien ist es zwingend erforderlich, eine koordinierte Kommunikation, Rekonfiguration und Interaktion zwischen dem Produkt und der Fertigung bzw. der Zelle oder Maschine zu gewährleisten. Grundlage hierfür sind die in Abschnitt 3.3 gezeigte Klassifizierung der PINT und das vorgestellte DSM (siehe Abschnitt 3.4). Zunächst werden wichtige Zeitpunkte für die Triggerung und Verzögerungszeiten zwischen den Teilnehmern, d.h. Produkt, Prozess und Datenbank, definiert [BT15]:

- t_{bp} - Beginn der Produktinstanz,
- τ_{pr} - Zeitverzögerung Produktlesezugriff,
- τ_{dbr} - Zeitverzögerung Datenbanklesezugriff,
- τ_{dp} - Zeitverzögerung Datenverarbeitung,
- τ_{rc} - Zeitverzögerung Rekonfiguration,
- τ_{Σ} - (Teil-) Prozess- oder Maschinendurchlaufzeit,
- τ_{rco} - Zeitverzögerung Online-Rekonfiguration,
- τ_{pk} - Zeitfenster Online-Produktkommunikation,
- τ_{pw} - Zeitverzögerung Produktschreibzugriff,
- τ_{dbw} - Zeitverzögerung Datenbankschreibzugriff,
- t_{ep} - Ende der Produktinstanz.

Bei den Zeitpunkten t_{bp} und t_{ep} handelt es sich um Ereignisse, die vom Maschinenzustand bzw. den in der Vergangenheit gefertigten Produkten und von den nicht deterministischen Verzögerungen auf den genutzten Kommunikationskanälen abhängen. Die Latenzen durch die Kommunikationsinteraktionen (τ_{pr} , τ_{dbr} , τ_{rc} , τ_{pk} , τ_{pw} und τ_{dbw}) können annähernd auf Basis der zu erwartenden Datenflüsse abgeschätzt werden. Hinzu kommen jedoch die nicht-deterministischen Verzögerungen des Kommunikationskanals. Die Verzögerung τ_{dp} der reinen Datenverarbeitung ist deutlich kleiner im Vergleich zu den anderen Zeiten, wird jedoch maßgeblich von der internen Abarbeitung im Betriebssystem der SPS bzw. des Mikrocontrollers beeinflusst bzw. vorgegeben. Dies gilt analog für die Zeitverzögerungen der Rekonfiguration τ_{rc} und τ_{rc} , mit der Ausnahme eines benötigten Fertigungsstopps für die Online-Rekonfiguration. Die Prozesszeiten τ_{Σ} für die Fertigung unterschiedlicher Produkte bzw. der Varianten wird in der Entwicklung einer Fertigungsanlage festgelegt und nach der Inbetriebnahme genau ermittelt.

Die im Folgenden beschriebenen produktgetriggerten Rekonfigurationsstrategien sind als grundlegende Koordinationsaufgabe des PTR innerhalb des in Abschnitt 5.2.1 vorgestellten produkttoleranten Regelkreises zu verstehen. Diese sind immer in Abhängigkeit der gewählten Produktintelligenz, d.h. Fähigkeiten, zu betrachten. Des Weiteren ist unter Berücksichtigung der gewählten Produktintelligenz zwischen zwei Arten der Rekonfiguration zu unterscheiden [BT15]:

- **Produktbasierte Rekonfiguration** bedeutet, dass die gewünschte produktspezifische hybride Systemdynamik und Referenztrajektorienplanung für die in Abschnitt 5.2.1 beschriebene Steuer- und Regelung während der Zeit τ_{rc} vollständig ausgewählt, parametrisiert und eingerichtet wird, bevor der produktabhängige Prozess $\tau_{\Sigma}(P_v)$ beginnt.

- **Produkt- und prozessbedingte Online-Rekonfiguration** impliziert, dass die produktbasierte Rekonfiguration vollständig abgeschlossen wurde, bevor der Fertigungsprozess τ_Σ beginnt. Online-Rekonfiguration (OR) beschreibt die Fähigkeit des produkttoleranten Rekonfigurators im Zusammenspiel mit dem HRG, dem HR und dem Produkt P_v , die hybride Dynamik und Referenztrajektorienplanung während der laufenden Prozessperiode τ_Σ , allerdings vor dem Ende des Produktzyklus t_{ep} , zu verändern. Im Falle von sicherheitsrelevanten Applikationen, kann die gesamte hybride Systemdynamik in einem sicheren Zustand für die Online-Rekonfigurationsverzögerung τ_{rco} überführt bzw. gestoppt werden. Abhängig von den Fähigkeiten des intelligenten Produktes existieren zwei mögliche Ereignisse zum Auslösen einer OR. Im Falle einer prozessbedingten OR generiert der Prozess das Ereignis für die Online-Rekonfiguration. Hierfür existieren keine Beschränkungen hinsichtlich Fähigkeiten des Produktes bzw. der Intelligenzklasse. Die produktbedingte OR ist nur möglich, wenn das Produkt die Fähigkeit der Interaktion aufweist, welches nur von der Klasse 4 erfüllt wird.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die unterschiedlichen Strategien zur Rekonfiguration für Off-board (Klasse 1. und 2.) und On-board Produktintelligenz (Klasse 3. und 4.).

Strategie für Off-board Produktintelligenz

Für die folgenden Betrachtungen verfügt das intelligente Produkt über die Fähigkeiten der Identifikation und der Datenspeicherung. Basierend auf diesen Fähigkeiten stellt das DSM (vgl. Abschnitt 3.4) den dezentralen Teilsystemen, wie beispielsweise den FZs bzw. dessen Maschinen, produktspezifische Informationen bereit, die erforderlich sind für die produktbasierte Rekonfiguration. Das Bild 5-4 zeigt die Online-Rekonfigurationsstrategien im Falle einer Off-board Produktintelligenz, wobei alle relevanten Größen und Signale mit einem hochgestellten a in Form von $(\cdot)^a$ gekennzeichnet sind. Die Ordinate ist in folgende fünf Aktionsabschnitte unterteilt: **1.a** Lese- und Schreibzugriff auf das Produkt, **2.a** Lese- und Schreibzugriff auf die Datenbank, **3.a** Datenverarbeitung, **4.a** produktbedingte Rekonfiguration sowie **5.a** Online-Rekonfiguration des Fertigungsprozesses bzw. der Maschine.

Des Weiteren ist die ereignis- und zeitabhängige koordinierende Steuerung als PETRI-Netz modelliert. Die Zustände bzw. Stellen sind gekennzeichnet durch z_i^a , wobei $i \in \mathbb{N}$ die Menge aller möglichen Zustände darstellt. Übergangsbedingungen zwischen den Zuständen, auch als Transition bezeichnet, sind durch t_{ij}^a dargestellt und können immer anwendungsspezifisch definiert werden. Im Laufindex der Transition bezeichnet i immer die aktuelle Stelle und j immer den folgenden Zustand ($i, j \in \mathbb{N}$). Eine detaillierte Übersicht und Erläuterung aller Zustände und Transitionen sind in den Tabellen 5-2 und 5-3 dargestellt.

Der Beginn des produktindividuellen Zyklus wird durch den lesenden Zugriff auf den Produktspeicher ausgelöst und ist gekennzeichnet durch den Zeitpunkt t_{bp}^a . Der Datenaustausch zwischen Produkt P_v und der FZ bzw. dessen Maschine erfolgt meistens über nicht-deterministische Kommunikationskanäle mit einer Verzögerung beim Lesezugriff τ_{pr}^a . Nach dem erfolgreichen Empfang einer eindeutigen Produktidentifikationsnummer ist der PTR in der Lage weitere produktspezifische Informationen von der DB anzufordern.

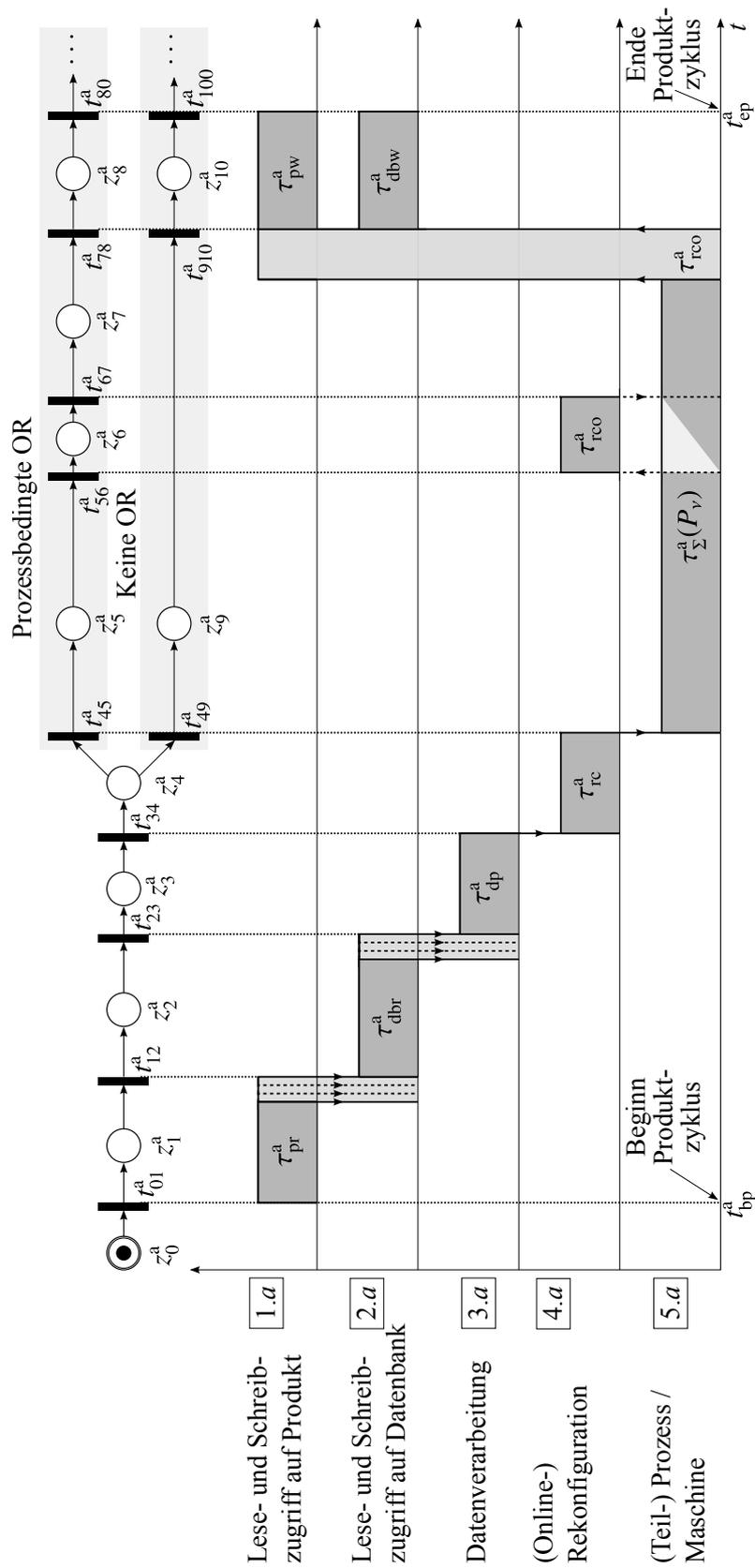


Bild 5-4: Zeitlicher Verlauf der produkttoleranten Rekonfiguration für Off-board PINT

Die Datenbank antwortet auf diese Anfrage mit einer Verzögerung von τ_{dbr}^a . Basierend auf allen relevanten Informationen berechnet die produktbasierte Rekonfiguration alle neuen Parameter für den HR und HRG während der Zeit τ_{dp}^a . Im Anschluss erfolgt die produktbasierte Rekonfiguration der Zellen bzw. dessen Maschinen mit hybrider Systemdynamik während der Zeitspanne τ_{rc}^a durch den PTR. Des Weiteren muss der PTR entscheiden, ob im produktspezifischen Prozess eine prozessbedingte Online-Rekonfiguration erforderlich ist oder nicht.

Im Folgenden startet der produktspezifische Fertigungsprozess für die Dauer von $\tau_{\Sigma}^a(P_v)$. Im Fall einer Online-Rekonfiguration reagiert der PTR auf ein prozessbedingtes Ereignis, welches z.B. das Erreichen einer definierten Position oder eines Prozessschwellwertes impliziert. Beim Auftreten des Ereignisses bestehen die Möglichkeiten den Prozess in einem sicheren Zustand für ein Online-Rekonfigurationszeitfenster τ_{rco}^a zu stoppen oder die OR während des laufenden (Teil-) Prozesses durchzuführen. Im Falle eines gestoppten Prozesses $\tau_{\Sigma}^a(P_v)$ muss der PTR die Zeitspanne τ_{rco}^a zur Fertigungszeit addieren, um sicherzustellen, dass sämtliche wertschöpfenden Fertigungsschritte abgeschlossen sind. Am Ende des Fertigungsschrittes werden die fertigungsvariablen produktspezifischen Daten während der Dauer τ_{pw}^a zurück in den Produktspeicher und/oder im Falle einer Datenbankaktualisierung während der Zeitspanne τ_{dbw}^a geschrieben. Die produktspezifische Fertigungsinstanz endet zum Zeitpunkt t_{ep}^a mit einer erfolgreichen Schreiboperation in den Produktspeicher bzw. die Datenbank. Ab diesem Zeitpunkt steht die Zelle bzw. Maschine für die produktindividuelle Fertigung bzw. einen Fertigungsschritt zur Verfügung, weil das bearbeitete Produkt in den Ausgangspuffer transportiert wurde.

Für eine Klasse 1 Produktintelligenz bspw. eine Barcode- oder DataMatrix-Produktidentifikation entfällt der Schritt τ_{pw}^a , indem fertigungsaktuelle Daten in den Produktspeicher geschrieben werden, da dies physikalisch nicht möglich ist.

Tabelle 5-2: Zustände der produkttoleranten Rekonfiguration bei Off-board PINT

Zustand	Bedeutung
z_0^a	Initialzustand, warten auf neues Produkt P_v
z_1^a	Lesezugriff auf das Produkt P_v
z_2^a	Lesezugriff auf Datenbank für zusätzliche Produktinformationen
z_3^a	Dezentrale Datenverarbeitung der Produktdaten
z_4^a	Produktabhängige Rekonfiguration und Entscheidung für OR
z_5^a	Start des Prozesses τ_{Σ} und warten auf Ereignis für die OR
z_6^a	Prozessbedingte OR mit oder ohne Verzögerung τ_{rco}
z_7^a	Restzeit des online-rekonfigurierten Prozesses
z_8^a, z_{10}^a	Prozess beendet, Schreibzugriff auf Produkt und Datenbank
z_9^a	Durchführung des Prozesses ohne OR

Tabelle 5-3: Transitionen der produkttoleranten Rekonfiguration bei Off-board PINT

Transition	Bedeutung
t_{01}^a	Produkt P_v detektiert → Lesezugriff Produkt gestartet
t_{12}^a	Produktdaten gelesen → Datenbankanfrage gestartet
t_{23}^a	Datenbankanfrage beendet → Datenverarbeitung gestartet
t_{34}^a	Datenverarbeitung beendet → Entscheidung Rekonfigurationsart
t_{45}^a	Prozessbedingte OR gestartet → Warten auf Prozessereignis
t_{56}^a	Prozessereignis eingetreten → Starte Online-Rekonfiguration
t_{67}^a	OR abgeschlossen → Restzeit des Prozesses abwarten
t_{78}^a, t_{910}^a	Prozess beendet → Starte Schreibzugriffe
t_{49}^a	Auswahl keine OR → Warten auf Prozessende
t_{80}^a, t_{100}^a	Schreibzugriff und Produktinstanz beendet → Neue Produktinstanz

Strategie für On-board Produktintelligenz

Ergänzend zu der Off-board PINT haben die Klassen 3. und 4. neben der Identifikation und Datenspeicherung die zusätzlichen Fähigkeiten der Datenverarbeitung und Interaktion.

Dies führt aufgrund der gestiegenen Anzahl an Kommunikationsteilnehmern mit notwendigen produktspezifischen Informationen zu einer anwendungsspezifischen höheren Komplexität der Daten- und Informationsstruktur. Das Bild 5-5 zeigt die OR Strategien für die On-board Produktintelligenz. In diesem Fall sind alle relevanten Größen und Signale mit einem hochgestellten b in Form von $(\cdot)^b$ gekennzeichnet. Zudem ist die ereignis- und zeitabhängige koordinierende Steuerung ebenfalls als PETRI-Netz mit den Zuständen z_i^b und Transitionen t_{ij}^b modelliert. Detaillierte Erläuterungen von z_i^b und t_{ij}^b sind den Tabellen 5-4 und 5-5 zu entnehmen. Im Vergleich zum Bild 5-4 sind in Bild 5-5 ebenfalls fünf Aktionsabschnitte über die Ordinate aufgetragen. Allerdings ist im Abschnitt **1.b** die Produktkommunikation aufgeführt, anstatt des einfachen Lese- und Schreibzugriffes auf den Produktspeicher. In diesem Szenario verfügt das Produkt über eine Intelligenz größer gleich der Klasse 3. Somit steht mindestens ein Speicher, ein Mikrocontroller für die Datenverarbeitung und eine separate, im Allgemeinen, aktive drahtlose Kommunikationsschnittstelle zur Verfügung.

Die Produktinstanz startet zum Zeitpunkt t_{bp}^b mit der PTR Datenverarbeitung, weil das Produkt über eine On-board Intelligenz verfügt und alle relevanten produktspezifischen Daten liefert bzw. vorab angefordert hat. Somit entfallen im Vergleich zur Off-board Produktintelligenz die Schritte Lesezugriff auf den Produktspeicher (vgl. Bild 5-4 **1.a**) und die Anforderung der produktspezifischen Daten von der DB (vgl. Bild 5-4 **2.a**). Nach der Zeitspanne für Datenverarbeitung $\tau_{dp,1}^b$ beginnt der PTR die produktbasierte Rekonfiguration des HR und des HRG während der Dauer τ_{rc}^b . Gleichzeitig entscheidet die produktbasierte Rekonfiguration zwischen einem produktspezifischen Prozess ohne OR, mit prozessbedingter OR und produktbedingter OR.

Die prozessbedingte OR ist annähernd identisch zu den Strategien im Falle einer Off-board Produktintelligenz und kann vorherigen Abschnitt nachvollzogen werden. Im Falle einer produktbedingten OR interagiert das Produkt P_v (Klasse 4.) mit dem dezentralen (Teil-) Prozess wie bspw. einer Fertigungszelle bzw. dessen interne Maschinen und kommuniziert

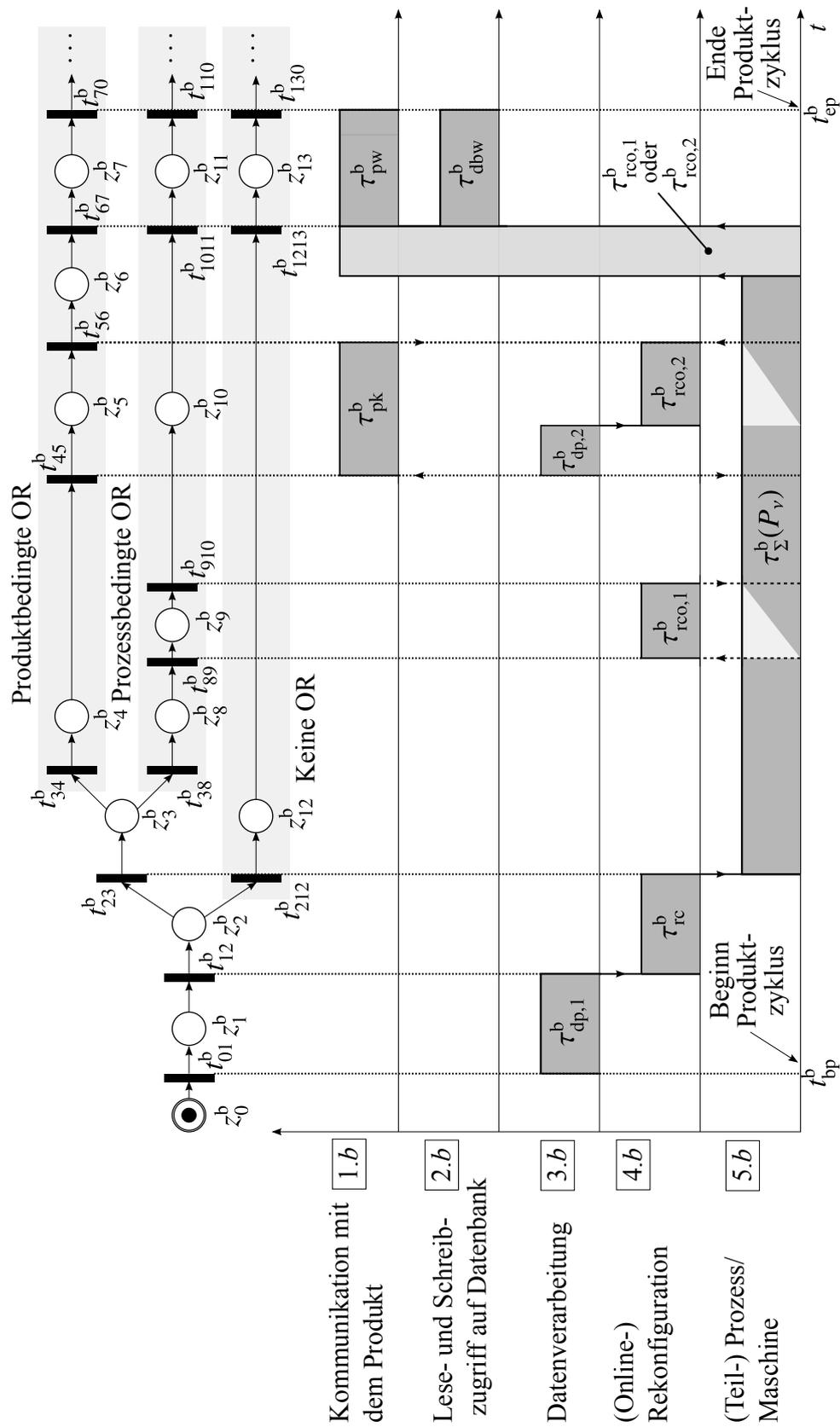


Bild 5-5: Zeitlicher Verlauf der produkttoleranten Rekonfiguration für On-board PINT

aktiv während τ_{pk}^b mit dem PTR um den eigenen Fertigungsprozess zu steuern. Während dieses Kommunikationsfensters findet eine zweite Datenverarbeitung $\tau_{dp,2}^b$ und ein Online-Rekonfigurationsintervall $\tau_{rco,2}^b$ im Falle eines möglichen sicheren Prozessstopps statt.

Um den Prozess $\tau_{\Sigma}^b(P_v)$ korrekt zu beenden, muss der PTR die Zeiten $\tau_{rco,1}^b$ bzw. $\tau_{rco,2}^b$ im Falle eines Stopps abwarten, bevor er die produktspezifischen Daten an das Produkt τ_{pw}^b bzw. die DB τ_{dbw}^b übermitteln kann. Die Produktinstanz endet mit der erfolgreichen Datenübertragung zum Zeitpunkt t_{ep}^b .

Falls es in einem Anwendungsszenario erforderlich ist, sind auch Mischformen d.h. eine produkt- und prozessbedingte OR während eines Maschinendurchlaufzeit $\tau_{\Sigma}^b(P_v)$ realisierbar. Dies müsste im Steuerungsentwurf der Rekonfigurationsstrategie (siehe Bild 5-5) ergänzt werden. Zudem ist es denkbar, dass während einer Teilprozessdurchlaufzeit $\tau_{\Sigma}^b(P_v)$ eine mehrfach OR erforderlich ist, weil sich das Werkstück bzw. Produkt P_v während des Fertigungsschrittes stark verändert und dies unmittelbar einen Einfluss auf die hybride Maschinensystemdynamik aufweist.

Im nachfolgenden Abschnitt wird ein Leitfaden für den Entwurf eines produkttoleranten Steuerungs- und Regelungskonzeptes aufgezeigt. Dieser reicht von der Auswahl der Produktintelligenz über Steuerungs- und Regelungssynthese bis hin zur Implementierung auf der Zielhardware.

Tabelle 5-4: Zustände der produkttoleranten Rekonfiguration bei On-board PINT

Zustand	Bedeutung
z_0^b	Initialzustand, warten auf neues Produkt P_v
z_1^b	Dezentrale Datenverarbeitung der Produktdaten
z_2^b	Produktabhängige Rekonfiguration sowie Entscheidung für Online-Rekonfiguration
z_3^b	Auswahl einer produkt- oder prozessbedingten OR
z_5^b	Produktbedingte OR mit Kommunikationsslot $\tau_{pk} = \tau_{dp,2} + \tau_{rco,2}$
z_6^b	Restzeit des online-rekonfigurierten Prozesses
z_4^b, z_8^b	Gestarteter Fertigungsprozess τ_{Σ} und warten auf Ereignis für die OR
z_9^b	Prozessbedingte OR mit möglicher Verzögerung $\tau_{rco,1}$
z_{10}^b	Restzeit des online-rekonfigurierten Prozesses
z_{12}^b	Durchführung des Prozesses ohne OR
$z_7^b, z_{11}^b, z_{13}^b$	Prozess beendet, Kommunikation mit Produkt und Datenbank

Tabelle 5-5: Transitionen der produkttoleranten Rekonfiguration bei On-board PINT

Transition	Bedeutung
t_{01}^b	Produkt P_v detektiert \rightarrow Datenverarbeitung starten
t_{12}^b	Datenverarbeitung beendet \rightarrow Entscheidung Rekonfiguration
t_{23}^b	Entscheidung für OR \rightarrow Auswahl Rekonfigurationsart
t_{34}^b	Produktbedingte Rekonfiguration \rightarrow Warten auf Produktereignis
t_{45}^b	Produktereignis eingetreten \rightarrow Starte Online-Rekonfiguration
t_{38}^b	Prozessbedingte Rekonfiguration \rightarrow Warten auf Produktereignis
t_{89}^b	Prozessereignis eingetreten \rightarrow Starte Online-Rekonfiguration
t_{56}^b, t_{910}^b	OR abgeschlossen \rightarrow Restzeit des Prozesses abwarten
t_{212}^b	Keine Online-Rekonfiguration \rightarrow Warten auf Prozessende
$t_{67}^b, t_{1011}^b, t_{1213}^b$	Prozess beendet \rightarrow Starte Kommunikation
$t_{70}^b, t_{130}^b, t_{110}^b$	Kommunikation und Produktinstanz beendet

5.3 Entwurfsleitfaden einer produkttoleranten Steuer- und Regelung

Dieser Abschnitt zeigt in Abhängigkeit der im Abschnitt 4.4.2 definierten Anforderungen einen Entwurfsleitfaden für die produkttolerante Steuer- bzw. Regelung eines dynamischen Systems. Konkret sind hierfür die Anforderungen $A_{PT,1}$ bis $A_{PT,7}$ von besonderer Bedeutung, da diese sich auf die erforderlichen Fähigkeiten bzw. Anforderungen der aus $R_{n,j}$ und $\Sigma_{n,j}$ bestehenden Maschine beziehen. Das Bild 5-6 zeigt einen dreiphasigen Entwurfsleitfaden zur Entwicklung von produkttoleranten Steuer- und Regelkreisen für flexibel agierende Maschinen. Neben den Phasen sind signifikante Entwurfsschritte und die phasenspezifischen Resultate aufgezeigt. Die Phase [1] beginnt mit der Identifikation der Anforderungen [1.1] an die produkttolerante Maschine/den produkttoleranten Prozess. Darauf aufbauend werden die konkreten Entwicklungsziele [1.2], die für alle nachfolgenden Schritte grundlegend sind, abgeleitet. Als Basis für alle produkttoleranten Prozesse und die Realisierung von intelligenten Produkten dienen Information und Daten. Innerhalb der Tätigkeitsphase [2.1] werden nahezu parallel die Informations- sowie Datenstrukturen gemäß dem Abschnitt 3.4 definiert sowie potenzielle Formen der Produktintelligenz für das betrachtete Prozessszenario verglichen. Sobald eine geeignete Klasse der Produktintelligenz (vgl. Abschnitt 3.3) gewählt und das DSM spezifiziert ist, beginnt der Schritt [2.2]. In diesem wird die Produktintelligenz in Abhängigkeit des spezifizierten Automatisierungsproblems technologisch konzeptioniert und realisiert. Am Ende dieser Phase existiert mindestens eine Realisierungsform (bspw. Funktionsmuster, Prototyp oder ein computergestütztes Modell) der für die Entwicklung einer produkttoleranten Steuerung sowie Regelung verwendet werden kann. In der letzten Phase [3] des Leitfadens erfolgt der eigentliche Entwurf [3.1] und die Synthese der hybriden produkttoleranten Steuer- und Regelung gemäß Bild 5-3. Parallel hierzu muss im Schritt [3.2] die produktgetriggerte Kommunikation, Rekonfiguration sowie Interaktion (gemäß Abschnitt 5.2.2) entworfen werden. Am Ende der [3] Phase existiert ein produkttoleranter Steuer- und Regelalgorithmus einer Maschine auf Basis von intelligenten Produkten, der in einem flexiblen Fertigungsumfeld mit hoher Variantenvielfalt zum Einsatz kommt.

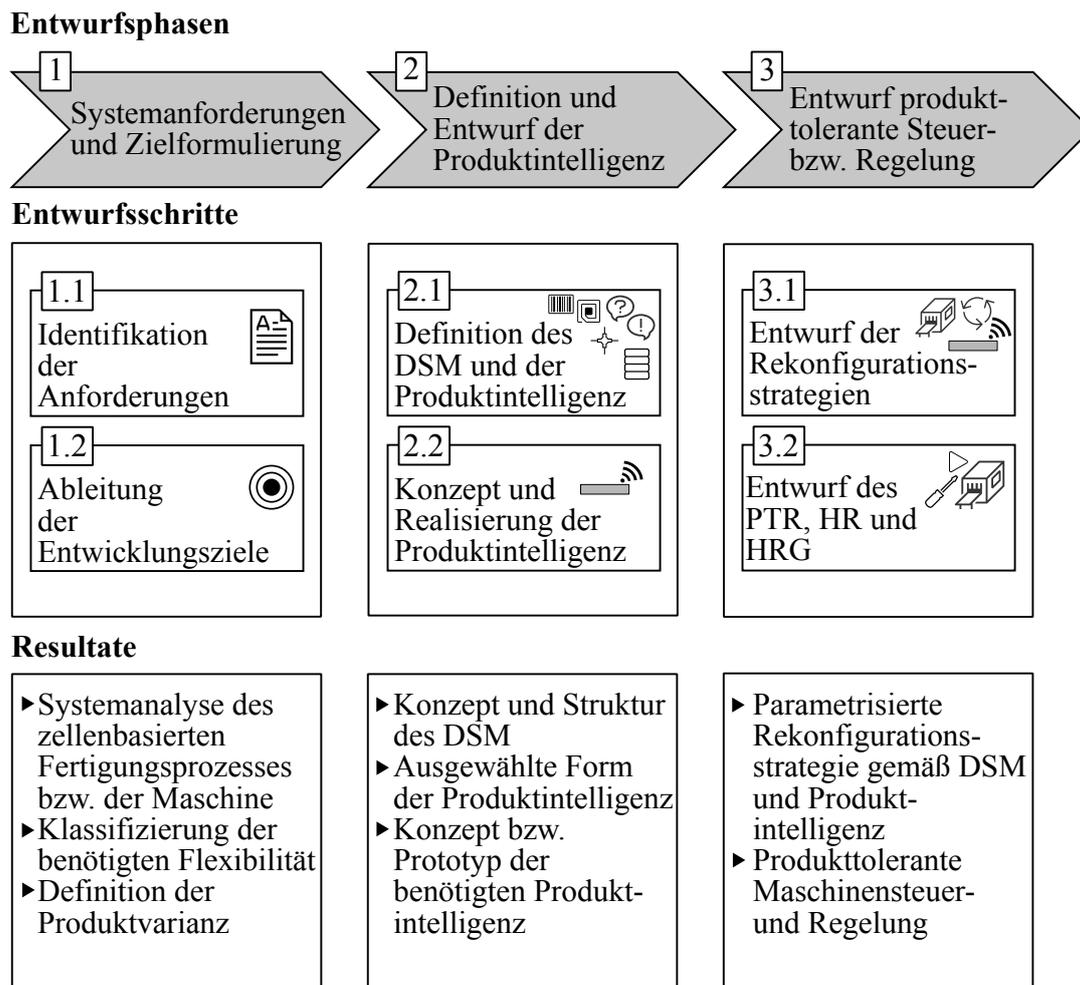


Bild 5-6: Entwurfsleitfaden für eine produkttolerante Steuer- bzw. Regelung

Nachfolgend werden die einzelnen Phasen und Zusammenhänge des Leitfadens im Detail erläutert.

Entwurfsphase 1: Systemanforderungen und Zielformulierung

Grundlegend für die Definition der Systemanforderungen und Zielformulierung muss zunächst die Frage beantwortet werden, ob es sich bei der betrachteten Maschine $\Sigma_{n,j}$, der Zelle Σ_n oder dem System (gemäß Abschnitt 2.1.1 und dem Bild 2-1) um eine Neuentwicklung oder einen bereits bestehenden Fertigungsprozess/-schritt handelt. Bei Neuentwicklungen können frühzeitig im Entwicklungsprozess die produkttoleranten Steuer- und Regelungsansätze sowie die Integration von intelligenten Produkten in der Hard- und Software berücksichtigt werden, während bei Bestandsanlagen und Maschinen die Hard- und Softwarekomponenten sowie Kommunikationsinfrastruktur oftmals unter anderen Rahmenbedingungen ausgewählt und implementiert wurden. Die Berücksichtigung dieses Sachverhaltes wird in der Phase 2 näher erläutert. Die Realisierung eines produkttoleranten Systems, erfordert die Integration von intelligenten Produkten. Grundvoraussetzung hierfür ist ein detailliertes Wissen der geplanten oder bestehenden vernetzten Steuerungs- und Regelungsstruktur ($R_{n,1}$ bis $R_{n,j}$). Von besonderem Interesse ist die Struktur der für

die Fertigung eines Produktes benötigten Maschinen und Ressourcen ($\Sigma_{n,1}$ bis $\Sigma_{n,j}$), sowie der Ablauf des Herstellungsprozesses. Zudem sollten relevante physikalische Kopplungen zwischen der Maschine $\Sigma_{n,j}$ und dem Produkt P_v , logistische Schnittstellen, die Produktvarianz ΔP_v und wichtige Operationen innerhalb der Fertigung identifiziert und analysiert werden. All diese Erkenntnisse fließen mit ein in die nachfolgende Klassifizierung der Flexibilität.

Gemäß dem Abschnitt 2.1.3, der Hierarchisierung (siehe Abschnitt 2.1.1) und Klassifizierung (siehe Abschnitt 2.1.2) von flexiblen Fertigungssystemen sind auf der Maschinen-, Zellen- und Systemebene die Fähigkeitsänderung, die Flexibilität und die Rekonfigurierbarkeit zur Fertigung einzelner Komponenten, Teilinstanzen oder Teilegruppen erforderlich (vgl. Bild 2-1).

Für die systematische Definition der Anforderungen einer Maschine, einer FZ oder eines Systems ist es zielführend, mindestens einen Teil der in Abschnitt 2.1.2 vorgestellten Klassifizierung zu verwenden. Hierbei ist es möglich zwischen unterschiedlichen Ebenen, Dimensionen und Attributen der Flexibilität zu unterscheiden. Zudem können Mischformen der Flexibilität hinsichtlich der Bereiche Produkt, Ressource und Prozess detailliert spezifiziert werden.

Dies kann textuell, tabellarisch oder in Form des in Bild 2-2 gezeigten UML Klassendiagramm erfolgen. Zielführend ist hierbei eine systematische Analyse, die in Abhängigkeit der Topologie für die unterschiedlichen Maschinen, Zellen und das System durchgeführt werden. Zum Beispiel können über die Ebenen der Flexibilität die Veränderlichkeit einer Maschine oder FZ beschrieben werden (vgl. Tabelle 2-3). Des Weiteren beschreibt die Dimension der Flexibilität bspw. die Kapazität, d.h. die Fähigkeit einer Maschine die gleichen Operationen in unterschiedlichen Größenordnungen durchzuführen (vgl. Tabelle 2-1). Zudem lassen sich die Dimensionen gezielter durch die Attribute (vgl. Tabelle 2-2) spezifizieren. Hierbei kann über die Varianz eine Menge von verschiedenen Operationen formuliert werden, die auf einer Maschine ausgeführt werden können. Für eine Bohrstation bedeutet dies, dass sie in der Lage sein soll Löcher mit einem Durchmesser von 1 mm bis 15 mm in Metall zu bohren. Ergänzend können zudem die Flexibilitätsbereiche des Produktes, der Ressource und des Prozesses über Merkmale definiert werden (vgl. Tabelle 2-4). Aus den aufgenommenen Systemanforderungen (Schritt 1.1), die bspw. in Form eines UML Klassendiagramms (vgl. Bild 2-2) dargestellt werden können, ergeben sich unmittelbar die verbindlichen Ziele für den nachfolgenden Schritt 1.2. Innerhalb der Phase 1 werden die Anforderungen $A_{PT,1}$ und $A_{PT,2}$ (vgl. Abschnitt 4.4.2) an ein produkttolerantes System berücksichtigt.

Entwurfsphase 2: Definition und Entwurf der Produktintelligenz

Flexibilität basiert auf geringen Reaktionszeiten und lokalen Entscheidungen (vgl. Abschnitt 2.2.1), die prozessnah und echtzeitfähig zur Laufzeit getroffen werden [TTV08; EW09; Ost12]. Für diese Entscheidungen benötigen die Steuer- und Regelungen $R_{n,j}$ Daten und Informationen über die Maschinen $\Sigma_{n,j}$, die Zellen Σ_n und insbesondere über das herzustellende Produkt P_v bzw. dessen Varianz ΔP_v . Hierfür wurde bereits in der Anforderung $A_{PT,3}$ (vgl. Abschnitt 4.4.2) und [BST16] die Notwendigkeit von Vernetzung und Dezentralisierung beschrieben. Dieses Erkenntnis geht auch aus dem in Abschnitt 2.2 gezeigten Vergleich typischer Steuerungsstrukturen der Automatisierungstechnik hervor.

Schritt 2.1: Definition des DSM und der Produktintelligenz

Zur Vernetzung von intelligenten Produkten P_v mit verteilten Maschinen $\Sigma_{n,j}$ bzw. Fertigungszellen Σ_n ist es erforderlich die notwendigen Informations- und Datenflüsse, die zur Realisierung der in Phase 1 festgelegten Flexibilität benötigt werden, zu identifizieren. Prinzipiell besteht die Kommunikation aus drei möglichen Teilnehmern: der Menge von intelligenten Produkten P_v , einer Datenbank und den vernetzten Steuerungen $R_{n,j}$ der FZ. Die Zellenregelung besteht aus $R_{n,j}$ vernetzten Maschinenregelungen, wohingegen jede Maschinenregelung wiederum aus einer Menge an Teilmaschinenreglern $R_{n,j,k}$ bestehen kann. Unter Verwendung, des in Abschnitt 3.4 definierten DSM, erfolgt die Darstellung der produktabhängigen Vernetzung. Hierbei können einer Kommunikation zwischen zwei Teilnehmern bspw. einem intelligenten Produkt P_v und einem Zellen- bzw. Maschinenregler eindeutige produktabhängige Datenflüsse zugeordnet werden (vgl. Tabelle 3-3).

Bei der Entwicklung von produkttoleranten Steuer- und Regelungsansätzen mittels intelligenter Produkte für eine Neuanlage oder Maschine erfolgt bereits frühzeitig die Berücksichtigung der lokal benötigten Rechenperformanz, Schnittstellen und Kommunikationsinfrastruktur bei der Konzeptionierung. Hierbei werden verschiedenste Möglichkeiten und Formen der Produktintelligenz verglichen, um eine für die Anwendung optimierte Lösung zu ermitteln. Im Falle einer bestehenden Anlage stellt sich die Frage, welche Änderungen an einem System durchgeführt müssen, um ein zusätzliches Maß an Flexibilität zu gewinnen. Diese Entscheidung wird individuell und aus der Sichtweise des Anwenders getroffen werden. Das Bild 5-7 veranschaulicht das iterative Vorgehen des Schrittes 2.1 zur Identifikation einer geeigneten Produktintelligenz. Des Weiteren werden innerhalb dieses Vorgehens die Anforderungen $A_{PT,3}$ und $A_{PT,4}$ (vgl. Abschnitt 4.4.2) an ein produkttolerantes System berücksichtigt.

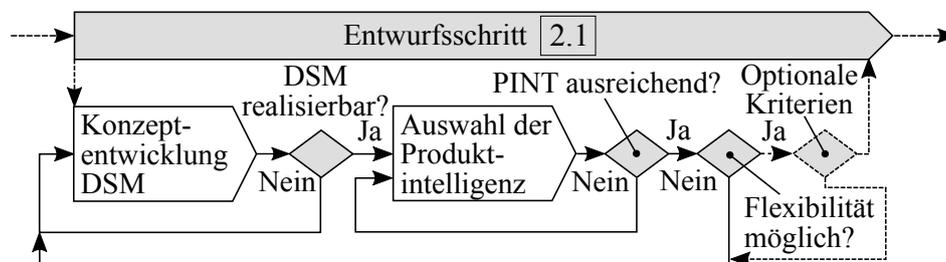


Bild 5-7: Ablauf der Tätigkeitsphase 2.1 für eine produkttolerante Steuer- bzw. Regelung

Hierfür wird eine geeignete Symbiose aus erforderlicher Produktintelligenz, gewünschter Flexibilität, produkttoleranten Zellen- bzw. Maschineneigenschaften und den entstehenden Kosten [Irr14] gesucht, die zur Erfüllung der Ziele aus 1 benötigt wird. Für die systematische Auswahl kann das in Abschnitt 3.3 vorgestellte dreidimensionale Klassifizierungsmodell für den Vergleich unterschiedlichster Realisierungsformen der Produktintelligenz genutzt werden. Die Komplexität der Daten- und Informationsstruktur ist abhängig von der gewählten Art der Produktintelligenz (vgl. Abschnitt 3.3) und von der benötigten Flexibilität aus Phase 1. Als Grad der produktabhängigen Vernetzung bzw. zusätzliches Vergleichskriterium zur Auswahl der Produktintelligenz kann die Komplexität des DSM verwendet werden, d.h. die Anzahl an produktspezifischen Informationsbeziehungen im DSM. Zudem muss die benötigte Kommunikationsbandbreite auf einem oder

mehreren Kommunikationskanälen und die informationstechnische Infrastruktur in die Betrachtungen einbezogen werden. Ein Netzdiagramm ermöglicht beispielsweise neben dem dreidimensionalen Klassifizierungsmodell der PINT die Berücksichtigung zusätzlicher Bewertungskriterien. Zudem ist die Durchführung einer morphologischen Analyse denkbar.

Schritt 2.2: Konzept und Realisierung der Produktintelligenz

Aus dem Schritt 2.1 resultiert eine gewählte Klasse der Produktintelligenz und ein Konzept für das DSM, welche die Grundlage für die technologische Realisierung der Produktintelligenz bilden. Ebenfalls resultiert aus 2.1 gemäß der Anforderung $A_{PT,5}$ eine Definition der Fähigkeiten, Entscheidungslokalität und des Intelligenzträgers (vgl. Abschnitte 3.3 und 4.4.2). Nachfolgend werden die drei Intelligenzfreiheitsgrade näher beschrieben:

1. **Fähigkeiten:** Für die Produktidentifikation stehen, wie in Abschnitt 3.1 gezeigt, eine Vielzahl von Technologien zur Verfügung. Diese müssen jedoch an die Umgebungsbedingungen des zu automatisierenden Prozesses angepasst werden. Neben einer eindeutigen Identifikationsnummer können bspw. auf einem DataMatrix-Label zusätzliche statische Informationen hinterlegt werden. Die Verwendung von RFID-Transpondern findet aufgrund ihrer Vielseitigkeit in der industriellen Applikation zunehmende Verwendung. Der Funktionsumfang reicht über Speicher (nur lesend oder lesend/schreibend), aktive oder passive Transponder (interne Batterie oder induktive Kopplung) und verschiedenste Frequenzbänder mit unterschiedlichen Reichweiten. Für die interne Datenverarbeitung ist im Produkt oder Produktträger ein Mikrocontroller erforderlich. Dieser ermöglicht beispielsweise die sensorbasierte Detektion und Bewertung von einwirkenden Umgebungseinflüssen wie z.B. der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit oder die auf das Produkt wirkende Beschleunigung. Eine Interaktion zwischen einem Maschinenregler $R_{n,j}$ und einem intelligenten Produkt P_v erfordert koordinierende Algorithmen auf dem Mikrocontroller des Produktes und $R_{n,j}$ sowie eine bidirektionale Kommunikationsschnittstelle wie beispielsweise NFC.
2. **Entscheidungslokalität:** Basierend auf der vorhandenen oder geplanten Infrastruktur für die Automation und den gewünschten Produktfähigkeiten ist es erforderlich zwischen einer Off- oder On-board Intelligenz für das Produkt oder den Produktträger zu wählen. Falls die Infrastruktur es zulässt, ist auch eine Mischung der beiden Intelligenzformen denkbar.
3. **Intelligenzträger:** Abschließend erfolgt die Entwicklung des Intelligenzträgers in Abhängigkeit des zu automatisierenden Prozesses. Neben den eigentlichen physikalischen Eigenschaften wie bspw. den Abmessungen muss die Entscheidung getroffen werden, ob die Produktintelligenz auch nach dem Fertigungsprozess noch im Produkt verbleiben muss/darf. Falls nicht, kann ein wiederverwendbarer intelligenter Produktträger verwendet werden. Im anderen Fall muss die Berücksichtigung der Produktintelligenz bereits im eigentlichen Entwicklungsprozess des zu fertigenden Produktes erfolgen.

Die konkrete physikalische und kommunikative Realisierung der Produktintelligenz impliziert immer die Kenntnis von Schnittstellen zwischen dem Produkt und dem Prozess, von

Prozessbedingungen und dem geplanten Fertigungsablauf. Diese Zusammenhänge werden in der folgenden Phase näher betrachtet.

Entwurfsphase 3: Entwurf produkttolerante Steuer- bzw. Regelung

Aus den vorherigen Entwurfsphasen 1 und 2 steht die Systemanalyse des Fertigungsprozesses hinsichtlich der gewünschten Flexibilität und der Handhabung der geforderten Produktvarianz zur Verfügung. Zudem wurde das Daten- und Schnittstellenmodell für die vernetzte Kommunikation sowie eine geeignete Form der Produktintelligenz realisiert. Darauf aufbauend können abschließend die Rekonfigurationsstrategien entworfen sowie der PTR, HR und HRG (siehe Abschnitt 5.2.1) entwickelt werden.

Entwurfsphase 3.1: Entwurf der Rekonfigurationsstrategien

Infolge des zugrunde liegenden DSM Konzeptes und der vorhandenen Produktintelligenz ist die Infrastruktur geschaffen worden eine produktindividuelle Rekonfiguration einer Maschinensteuer bzw. -regelung durchzuführen. Darauf aufbauend beschreiben die in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten produktgetriggerten Kommunikations-, Rekonfigurations- und Interaktionsstrategien ein wesentliches Bindeglied zwischen Maschine und intelligentem Produkt gemäß der Anforderung $A_{PT,6}$. Durch die definierten Abläufe, kann in Abhängigkeit der On- bzw. Off-board Produktintelligenz eine koordinierte Kommunikation und Interaktion gewährleistet werden. Die gezeigten PETRI-Netz basierten Sequenzen müssen lediglich an die vorliegende Vernetzungstopologie anpasst und die anwendungsspezifischen Transitionsbedingungen formuliert werden. Für den PTR ist somit sichergestellt, dass immer die erforderlichen produktspezifischen Informationen vorliegen, die für aktuelle Entscheidungsphase benötigt werden.

Entwurfsphase 3.2: Entwurf des PTR, HR und HRG

Grundlegend für den Entwurf des PTR ist zum einen die in 1 definierte Produktvarianz ΔP_v , die mit dem betrachteten Fertigungssystem, bestehend aus Fertigungszellen und dessen Maschinen (siehe Abschnitt 4.3), produziert werden soll. Nach $A_{PT,7}$ liegt der Fokus beim PTR Entwurf auf der Steuer- bzw. Regelung der Maschinen $R_{n,j}$ und der Maschinenteilsysteme $R_{n,j,k}$. In Anlehnung an die von Buss in [Bus02] gezeigte Vorgehensweise zum Entwurf hybrider Regelungen zeigt das Bild 5-8 den Entwurfsschritt 3.2 mit dem Fokus auf dem Entwurf von produkttoleranten Maschinensteuerungen und -regelungen. Zu Beginn erfolgt die Formulierung der produkttoleranten Problemstellung. Hierbei muss auf Basis der definierten PINT P_v mit der Varianz ΔP_v die erforderlichen Änderungen in der ereignisdiskreten und kontinuierlichen Maschinendynamik $\Sigma_{n,j}$ bzw. $\Sigma_{n,j,k}$ zur Erfüllung der Produktbedürfnisse abgeleitet werden. Beispielsweise könnte es bei einer Fertigungsmaschine erforderlich sein, die Regelstrategie von einer Drehzahl- zu einer Positionsregelung in Abhängigkeit der Produktvarianz ΔP_v umzuschalten.

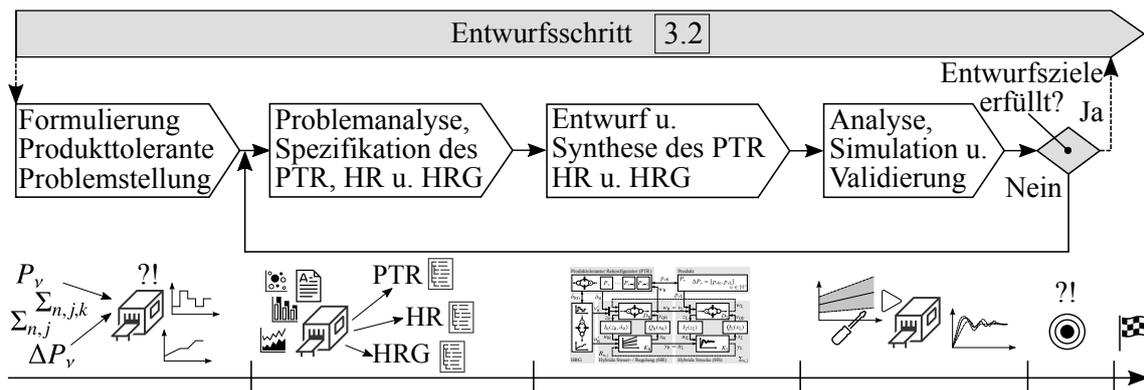


Bild 5-8: Ablauf der Tätigkeitsphase 3.2 für eine produkttolerante Steuer- bzw. Regelung

Zudem kann die Parametrisierung eines PI-Reglers, d.h. der Proportionalbeiwert und/oder die Zeitkonstante unter Berücksichtigung der Produktbedürfnisse rekonfiguriert werden. Die Vorgehensweise gilt ebenfalls für eine Vielzahl anderer Steuerungs- und Regelungskonzepte, welche bspw. in [Föll13; Bus02] beschrieben sind. Auf Basis einer Analyse der Problemstellung, die beispielsweise mit einem Simulationsmodell der Maschine bzw. dessen Teilsystemen und/oder einem realen Prototyp durchgeführt wird, kann die Spezifikation des PTR, HR und HRG erfolgen. Umfang dieser Analyse könnte bspw. eine Untersuchung der Maschinendynamik hinsichtlich unterschiedlicher Produkteigenschaften verursacht durch die Varianz ΔP_v , darstellen. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, welche Aufgaben und Funktionen der PTR neben den in Schritt 3.1 festgelegten Rekonfigurationsstrategien zu erfüllen hat. Basierend auf den direkten vom DSM zur Verfügung gestellten Produktparametern p_{vR} ist der PTR über anwendungsspezifische Funktionen in der Lage den HR und HRG zu steuern. Dies könnte zum Beispiel eine von der Produktmasse oder Abmessungen abhängige Solltrajektorie sein. In einem anderen Fall muss für die Fertigung einer Produktvariante eine exakte Positionsregelung vorgenommen werden, während für die anderen Varianten lediglich eine Geschwindigkeitsregelung mit festen Haltepunkten benötigt wird. Für einen zuverlässigen Betrieb der Maschine muss somit spezifiziert werden, wie der PTR über das Steuersignal δ_R den HR zu rekonfigurieren hat. Zudem ist die Definition der vom HRG benötigten produktspezifischen Sollwerttrajektorien vorzunehmen, die ebenfalls vom PTR über das Steuersignal δ_{RG} parametrisiert und koordiniert werden. Zusammenfassend liefert die Problemanalyse die technische Sollspezifikation und die geforderte Regelgüte.

Falls aus der Problemanalyse bereits ein Simulationsmodell vorhanden ist, kann dies beispielsweise für den Entwurf und Synthese des PTR, HR und HRG verwendet werden. Ein mögliches, und in der Praxis zunehmend verbreitetes Simulationswerkzeug, ist MATLAB/SIMULINK. Neben der signalflossorientierten Modellierung, welche bspw. für die Abbildung des beim NZM erforderlichen erweiterten Zustandsraummodells dient, können ereignisdiskrete Steuerungen über STATEFLOW abgebildet werden. Dadurch ist es möglich das ereignisdiskrete Teilsystem des NZM, sowie den PTR abzubilden. Die erforderliche sichere Konvertierung eines SIPN in die unter Stateflow zur Verfügung stehenden Zustandsautomaten wurde von SCHNABEL et al. in [SNK99a] gezeigt.

Basierend auf einem validen Modell oder einem realen Prototypen erfolgt die Festlegung der benötigten Reglerstrukturen des HR und die durch den PTR veränderbaren Reglerparameter. Zudem muss die produktspezifische Solltrajektorienvorgabe des HRG entworfen

und über den PTR steuerbar sein. Die Auswahl geeigneter Reglerstrukturen muss immer maschinen- und fertigungsspezifisch ermittelt werden. Neben dem in nachfolgendem Abschnitt 5.4 detailliert betrachteten Beispiel wird zusätzlich noch auf die Literaturquellen verwiesen, in denen die Regelung von hybriden dynamischen Systemen behandelt wird [BSW01; BSBS00; HL05; Tab09; BKLS06; Mal98; XX14; YJC10; OREM00; OT08; Osm15; MK00; BBM00]. Neben der gewünschten Systemdynamik sind die Stabilität und Erreichbarkeit bei einem hybriden Regelkreis von zentraler Bedeutung [Bus02; Nen01; EFS02; LL09]. Die Stabilitätsanalyse eines hybriden Regelkreises kann im Vergleich zu den klassischen Methoden eines linearen zeitinvarianten Systems, bei der die Lage der Polstellen bzw. die Phasenreserve betrachtet werden [Föl13], sehr komplex werden [Bus02]. Zur Beurteilung der Stabilität eines hybriden Systems werden in [Bus02; Nen01] zahlreiche Methoden vorgestellt, die auf der Untersuchung von LYAPUNOV-Funktionen basieren. Letztendlich muss eine geeignete Methode immer am Grad der Hybridisierung ausgewählt werden, d.h. welche Wertigkeit haben die ereignisdiskrete und kontinuierliche Dynamik im Gesamtsystem [Nen01]. Die Erreichbarkeit eines ereignisdiskreten Systems, wie z.B. eines SIPN, besagt, dass über eine geeignete Eingangs-/Transitionsfolge jeder Zustand des Netzes erreicht werden kann [Lit12]. Diese Eigenschaft kann über einen Erreichbarkeitsgraphen untersucht werden [Lit12]. Nach [Bus02; Nen01; NNKL01] ist ein hybrides System erreichbar, wenn ein hybrider Zustand von einem hybriden Startpunkt in endlicher Zeit über eine zulässige hybride Eingangstrajektorie überführt werden kann. Über die in [SNK99b; Nen01] vorgestellten Analysen der Erreichbarkeitsmengen kann diese Eigenschaft untersucht werden. Hierbei gilt ebenfalls, zwischen den Methoden zur Analyse in Abhängigkeit der maßgeblichen ereignisdiskreten und kontinuierlichen Eigenschaft abzuwägen.

Die Verifikation der entwickelten produkttoleranten Steuer- und Regelung einer Maschine erfolgt durch Analyse innerhalb einer Simulation oder durch eine Validierung an einem Prototyp. Werden die Spezifikationen bzw. Entwurfsziele nicht eingehalten, geht man zurück zur Problemanalyse und entwirft einen oder mehrere neue PTR, HR und HRG. Der Entwurfszyklus ist erfolgreich abgeschlossen, wenn das produkttolerante Steuer- und Regelungskonzept durch Simulation oder Validierung zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Der gesamte Entwurfsleitfaden wird im Folgenden verwendet, um die produkttolerante Steuer- und Regelung eines Transport- und Handlingszenarios zu entwerfen und auf Basis von Simulationsmodellen sowie einem realen Prototyp zu validieren.

5.4 Produkttolerante Steuer- und Regelung am Beispiel eines Transportszenarios für die zellenbasierte Fertigung

Aufgrund unterschiedlicher Produktbeschaffenheiten infolge zunehmender Produktvarianz ΔP , kann innerhalb einer FZ bzw. einer Maschine die Notwendigkeit auftreten, dass die Produkte individuell hinsichtlich ihrer Bedürfnisse bzw. unterschiedlichen Fertigungsschritte befördert werden müssen. Das Beispiel inklusive der Topologie wurde ausgewählt, weil sich dieses Szenario der produkttoleranten Rekonfiguration auf eine Vielzahl anderer Applikation aus dem Bereich der Automatisierungs- und Fertigungstechnik (z.B. Montageaufgaben, Bohrtätigkeiten, u.v.m) übertragen lässt [BT15; BET15; BVH⁺15]. Im Folgenden wird gezeigt, wie flexibel und gesamtheitlich ein dezentraler produkttoleranter Steuerungs- und Regelungsansatz genutzt werden kann.

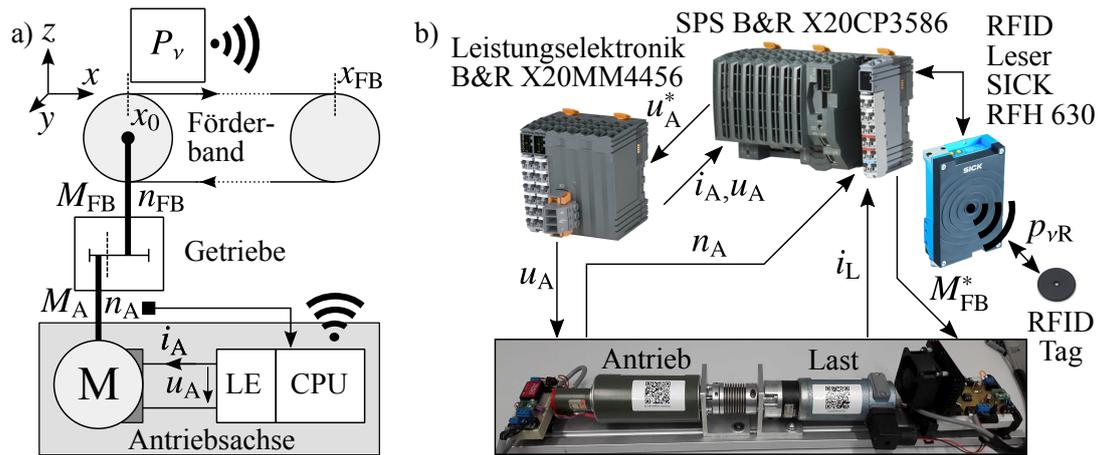


Bild 5-9: Transportszenario: a) Prinzipskizze b) Aufbau des realen Prüfstandes
(Quellen: SICK AG und Bernecker+Rainer Industrie Elektronik Ges.m.b.H.)

Das Bild 5-9 a) zeigt eine Prinzipskizze und b) einen Aufbau des realen Prüfstandes zur Untersuchung des Transportszenarios. Gemäß der Entwurfsphase **1** bzw. **1.1** soll der in Bild 5-9 b) gezeigte Motorenprüfstand, welcher ursprünglich nur aus der SPS, Leistungselektronik sowie dem gekoppelten Antriebs¹⁰- und -Lastmotor¹¹ bestand, für die Demonstration eines produkttoleranten Transportszenarios (siehe Bild 5-9 a) genutzt werden. Hierbei soll auf Basis einer geeigneten Form der Produktintelligenz die kaskadierte Antriebsregelung und Solltrajektorienvorgabe des Förderbandes dynamisch und individuell für jedes Produkt angepasst werden. Des Weiteren ist die physikalische Rückkopplung der variierenden Produkteigenschaften über unterschiedliche Lastszenarien zu berücksichtigen. Die Produktvarianz ΔP_v , wird im Wesentlichen durch die Masse m_p (0 – 2 kg) sowie die Abmessungen in: x_p (0 – 100 mm), y_p (0 – 200 mm) und z_p (0 – 400 mm) bestimmt. Hinzu kommen die individuellen Produktbedürfnisse, welche sich in drei unterschiedlichen Beförderungsszenarien: Komfort, Geschwindigkeit und Position äußern. Während des laufenden Transportes kann es zu prozessbedingten Masseänderungen des Produktes kommen, weil eine fertigungsbedingte Haltevorrichtung vom Produkt entfernt wurde.

Nach dem Entwurfsschritt **1.2**, muss das produkttolerante Transportszenario die Flexibilität bzw. die Fähigkeiten besitzen um die Produkte gemäß ihrer Bedürfnisse und der Produktvarianz ΔP_v zu befördern. Aus Sicht der Flexibilitätsdimension ist hierfür die Funktionalität von besonderer Bedeutung, welche den Umfang der zur Verfügung stehenden Operationen beschreibt (vgl. Tabelle 2-1). Zudem sind die Attribute Varianz und Beweglichkeit ebenfalls notwendig, weil sie die Veränderbarkeit und den Übergang zwischen den unterschiedlichen Verhaltensweisen des Systems beschreiben (vgl. Tabelle 2-2). Nach der Definition von OSTGATHE, sind die Betriebsmittel- und Produktionsflexibilität des Transportsystems erforderlich (siehe Tabelle 2-4). Nach Abschluss der Entwurfsphase **1**, muss im Schritt **2.1** das Daten- und Schnittstellenmodell spezifiziert werden, welches in Tabelle 5-6 dargestellt ist.

¹⁰Gleichstrommotor der Firma Maxon vom Typ F2260 (siehe Datenblatt im Anhang A1-3)

¹¹Gleichstromgetriebemotor der Firma Engel (Typ GNM3150 mit 5:1 Getriebe Engel-GP 48.2 - siehe Datenblatt im Anhang A1-1)

Tabelle 5-6: PPS zwischen Produkt und Transportband

Produkt-Prozess Schnittstelle (PPS)				
Daten	Typ	Wertbereich	Kommunikation	Richtung
PPS.ID	UINT64	0 ... $2^{64} - 1$	P_v^\uparrow	→
PPS.Modus	UINT32	0:=Komfort, 1:=Schnell, 2:=Position	P_v^\uparrow	→
PPS.Gewicht	UINT32	0 – 2 kg	P_v^\uparrow	→
PPS.AbmessungX	UINT32	0 – 100 mm	P_v^\uparrow	→
PPS.AbmessungY	UINT32	0 – 200 mm	P_v^\uparrow	→
PPS.AbmessungZ	UINT32	0 – 400 mm	P_v^\uparrow	→
PPS.Prozesszähler	UINT32	0 bis $2^{16} - 1$ Stationen	P_v^C	↔

Der PTR benötigt für die Erfüllung der geforderten Flexibilität die Informationen über das jeweilige Produktbedürfnis und die physikalischen Eigenschaften. Zudem werden die Identifikationsnummern (PPS.ID) und ein fortlaufender Prozesszähler (PPS.Prozesszähler) für die Koordination benötigt. Zur Realisierung des DSM und der geforderten Flexibilität ist keine On-Board Produktintelligenz (Klasse 3. bzw. 4.) erforderlich (siehe Tabelle 3-1), da keine Datenverarbeitung und/oder Interaktion benötigt wird. Für die Speicherung der Produktbedürfnisse und Eigenschaften soll aufgrund der direkten Verfügbarkeit der Speicherplatz innerhalb des intelligenten Produktes der Klasse 2. selbst genutzt werden. Im Entwurfsschritt [2.2] wurde für die Realisierung der Produktintelligenz ein RFID Leser der Firma SICK vom Typ RFH 630 ausgewählt. Jedes Produkt P_v wird mit einem SICK RFID Tag ausgestattet, welcher neben einer 64 Bit ID zusätzlich über 28 Speicherplätze mit je 32 Bit verfügt (siehe Bild 5-9 b). Nachfolgend wird die in Schritt [3.1] beschriebene Anpassung der produkttoleranten Rekonfiguration für Off-board Produktintelligenz (siehe Bild 5-4) basierend auf dem DSM und der gewählten PINT vorgenommen. Insgesamt dauert der Produktlesezyklus $\tau_{pr}^a = 40$ ms, welcher sich aus den 18 ms für die ID, 21 ms für die sechs 32 Bit Wörter und 1 ms für die Verzögerung auf dem Feldbus zusammensetzt (siehe Datenblatt RFH 630 im Anhang A1-4). Für die Schreiboperation τ_{pw}^a des Prozesszählers werden insgesamt 17 ms benötigt. In dem DSM ist keine Datenbank vorgesehen, deshalb sind $\tau_{dpr}^a = \tau_{dppw}^a = 0$ s. Das gesamte produkttolerante Regelungskonzept wird auf einer B&R SPS mit einer Zykluszeit von $500 \mu s$ berechnet. Innerhalb dieser Zeit wird neben aller Berechnungen die für den PTR erforderlich sind τ_{dp}^a auch im Falle von validen Ergebnissen die produktbasierte Rekonfiguration τ_{rc}^a durchgeführt. Es gilt somit $\tau_{dp}^a + \tau_{rc}^a = 500 \mu s$. Gemäß des Schrittes [3.2] erfolgt zuletzt der Entwurf des PTR, HR und des HRG. Hierfür wird zunächst die produkttolerante Problemstellung formuliert. Das Bild 5-10 zeigt, die Trajektorien für die Solldrehzahl n_A^* und die Sollposition x_A^* , welche auf Basis der Produkteigenschaften und Bedürfnisse angepasst werden sollen.

Neben dem eigentlichen Wert der Solldrehzahl wird zusätzlich noch die Beschleunigung produktspezifisch angepasst. Zum Zeitpunkt t_{PR} (siehe ①) kann eine Umschaltung von einer reinen Drehzahl- zu einer überlagerten Positionsregelung erfolgen. Die mögliche Reaktion des Drehzahlregelkreises ist in ② dargestellt.

Die konstanten Parameter sind wie folgt definiert: R_A -OHMScher Wicklungswiderstand, L_A - Wicklungsinduktivität, k_A - elektrische Motorkonstante, Θ - Trägheitsmoment von Motor und Last sowie r_A - Radius der Antriebswelle. Die Winkelgeschwindigkeit des Antriebsmotors wird durch ω_A abgebildet.

Der Injektor

$$I_{\Sigma} : u_{I\Sigma} = \begin{cases} M_{FB}(P_1), & \text{wenn } z_{\Sigma 2} \\ M_{FB}(P_2), & \text{wenn } z_{\Sigma 4} \\ M_{FB}(P_3), & \text{wenn } z_{\Sigma 6} \\ 0, & \text{wenn } z_{\Sigma 1}, z_{\Sigma 3}, z_{\Sigma 5} \end{cases} \quad (5-1)$$

verändert in Abhängigkeit der indirekten Produktparameter $p_{v\Sigma}$ das Lastmoment M_{FB} des Motors (siehe Gleichung (5-1)) infolge der Vorgaben aus dem PETRI-Netz basierten Systemteil D_{Σ} . Aus der aktuellen Antriebsposition x_A und der Endposition des Förderbandes x_{FB} berechnet der Quantisierer Q_{Σ}

$$Q_{\Sigma} : v_{Q\Sigma} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } |x_A| < x_{FB} \\ 1, & \text{wenn } |x_A| \geq x_{FB} \end{cases} \quad (5-2)$$

die diskrete Eingangsgröße $v_{Q\Sigma}$. Zusätzlich werden innerhalb der Transitionen t_{Σ} und Zustände z_{Σ} der produktabhängigen PETRI-Netze (P_1, P_2 und P_3) der ereignisdiskreten Streckendynamik

$$D_{\Sigma} := \begin{cases} t_{\Sigma 1} = p_{1\Sigma} \wedge \neg v_{Q\Sigma} \\ t_{\Sigma 2} = p_{1\Sigma} \wedge v_{Q\Sigma} \\ t_{\Sigma 3} = p_{2\Sigma} \wedge \neg v_{Q\Sigma} \\ t_{\Sigma 4} = p_{2\Sigma} \wedge v_{Q\Sigma} \\ t_{\Sigma 5} = p_{3\Sigma} \wedge \neg v_{Q\Sigma} \\ t_{\Sigma 6} = p_{3\Sigma} \wedge v_{Q\Sigma} \\ z_{\Sigma 1} = \neg P_1 \\ z_{\Sigma 2} = P_1 \wedge \neg P_2 \wedge \neg P_3 \\ z_{\Sigma 3} = \neg P_2 \\ z_{\Sigma 4} = \neg P_1 \wedge P_2 \wedge \neg P_3 \\ z_{\Sigma 5} = \neg P_3 \\ z_{\Sigma 6} = \neg P_1 \wedge \neg P_2 \wedge P_3 \end{cases} \quad (5-3)$$

die indirekten Produktparameter $p_{v\Sigma}$ verarbeitet. Durch Rückführung der Ausgangsgrößen y_{Σ} zum Regler R ergibt sich ein geschlossener Regelkreis, der vom HRG über die Größen n_A^* und x_A^* seine Solltrajektorienvorgabe erhält. Über den Injektor

$$I_R : u_{IR} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } z_{R1} \wedge \neg z_{R2} \\ 1, & \text{wenn } \neg z_{R1} \wedge z_{R2} \end{cases}$$

ist der PTR in der Lage das Signal u_{IR} für eine Umschaltung zwischen den beiden Regelstrategien auszulösen. Die, für die Koordinierung erforderliche, positionsabhängige Schaltschwelle wird über den Quantisierer

$$Q_R : v_{QR} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } |x_{FB} - x_A| > \Delta x_A \\ 1, & \text{wenn } |x_{FB} - x_A| \leq \Delta x_A \end{cases} \quad (5-4)$$

erzeugt. Somit kann

$$D_R := \begin{cases} t_{R1} = v_R^* \wedge v_{QR} \\ t_{R2} = \neg v_R^* \wedge \neg v_{QR} \\ z_{R1} = \neg z_{R2} \\ z_{R2} = \neg z_{R1} \end{cases}$$

über v_{QR} und δ_R bzw. die Transitionen t_R bzw. die Zustände z_R sowie den HRG gesteuert werden. Die drei unterschiedlichen Regler sind wie folgt definiert:

$$K_R := \begin{cases} u_A = SR \cdot (i_A^* - i_A), \text{ Stromregelung} \\ i_A^* = DR \cdot (n_A^* - n_A), \text{ Drehzahlregelung} \\ n_A^* = PR \cdot (x_A^* - x_A), \text{ Positionsregelung} \end{cases}$$

Auf Basis des unter MATLAB/SIMULINK aufgebauten und validierten Modells wird im Folgenden der Entwurf des PTR beschrieben. Für die Beförderung innerhalb der unterschiedlichen in Tabelle 5-6 definierten Betriebsmodi wurden folgende Solldrehzahlen angenommen: Komfort $\hat{=} 300 \text{ min}^{-1}$, Schnell $\hat{=} 500 \text{ min}^{-1}$ und Position $\hat{=} 200 \text{ min}^{-1}$ bis zum Erreichen des Umschaltzeitpunktes. Auf Basis der Produktmasse m_p , der Abmessungen (x_p, y_p, z_p) und des Volumens V_p berechnet der PTR die zulässige Beschleunigung nach

$$\text{HRG} : \left| \frac{dn_A^*}{dt}(p_{vR}) \right| = \begin{cases} 25 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{s}}, \text{ wenn } m_p \leq 0,25 \text{ kg} \wedge z_p \geq 250 \text{ mm} \\ 100 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{s}}, \text{ wenn } m_p > 0,25 \text{ kg} \wedge V_p < 0,006 \text{ m}^3 \wedge z_p \leq 200 \text{ mm} \\ 50 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{s}}, \text{ sonst.} \end{cases}$$

Zudem kann es nach Gleichung 5-5 zu einer prozessbedingten Online-Rekonfiguration

$$\text{HRG} : 0 > \frac{dn_A^*}{dt}(p_{vR}) = -25 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{s}}, \text{ wenn } \Delta m_p \geq 0,15 \text{ kg} \quad (5-5)$$

der Solldrehzahltrajektorie kommen, wenn eine Halterung vom Produkt entfernt wurde. Im Folgenden wird die Gesamtsystemdynamik des entwickelten produkttoleranten Transportszenarios in Form des Modells mit dem realen Prüfstand verglichen.

Beide Ansätze wurden über C-Code Generation auf der B&R SPS implementiert. Die Ausführung des Modells und der realen produkttoleranten Regelung erfolgt mit einer Zykluszeit von $500 \mu\text{s}$.

Das Bild 5-12 zeigt für das Modell bzw. für den Prüfstand die Motordrehzahl n_A , die Motorposition x_A und das antriebsseitige Lastmoment M_{FB} , welches infolge der produktspezifischen Lasten variiert. Das erste Produkt P_1 (siehe ③) wird im Modus Komfort mit einer maximalen Beschleunigung von $50 \text{ min}^{-1}/\text{s}$, welche vom PTR bestimmt wurde, transportiert. Die Verläufe des Modells und des realen Systems weisen eine gute Übereinstimmung auf. Für das zweite Produkt P_2 (siehe ④) gilt der Transportmodus Geschwindigkeit, welcher eine maximale Beschleunigung $100 \text{ min}^{-1}/\text{s}$ zur Folge hat.

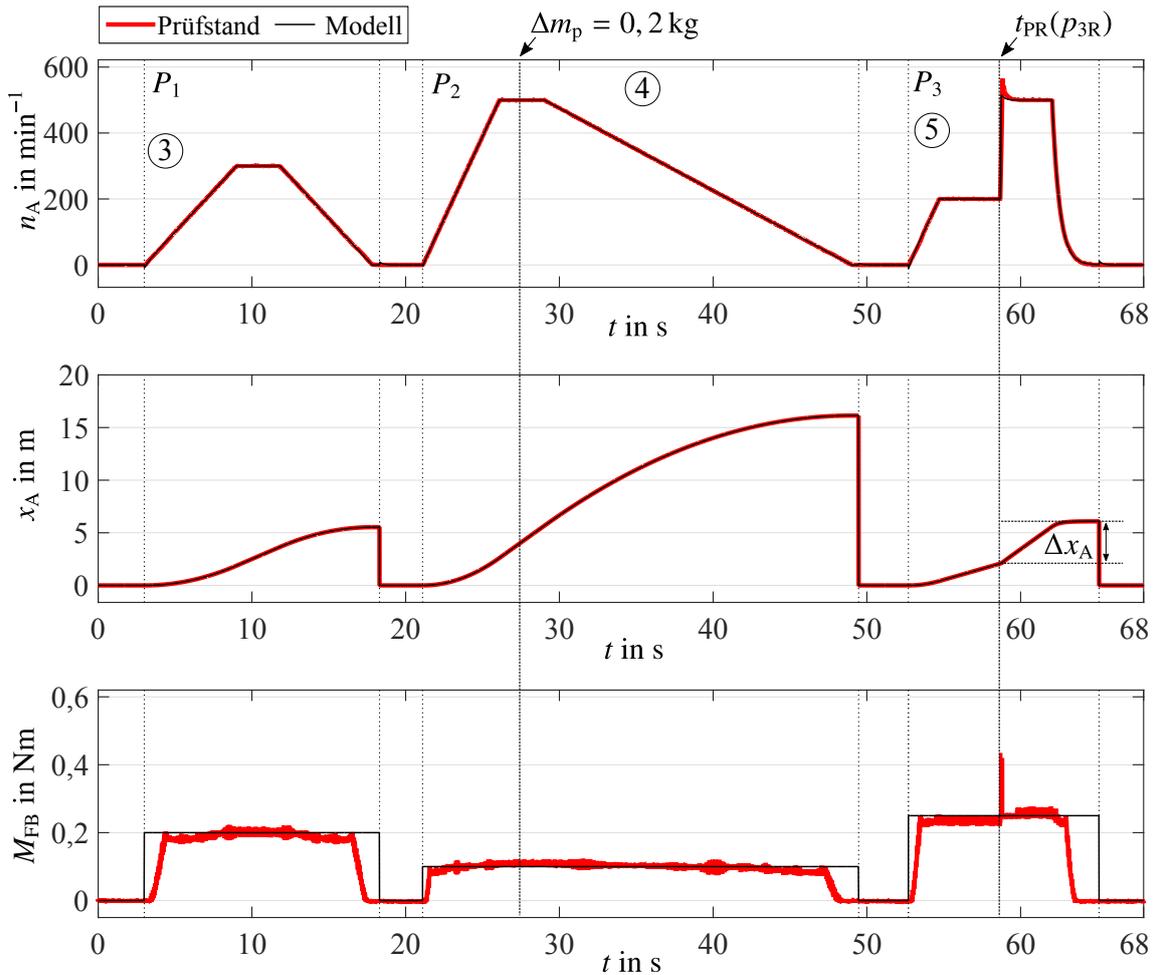


Bild 5-12: Produkttolerante Trajektorienanpassung und Umschaltung der Regelstrategie

Zum Zeitpunkt $t = 27 \text{ s}$ kommt es gemäß der Gleichung (5-5) zur einer Anpassung der Bremsrampe auf $-25 \text{ min}^{-1}/\text{s}$, weil eine prozessbedingte Halterung vom Produkt entfernt wurde. P_3 (siehe ⑤) wird im Modus Position mit einer maximalen Soll Drehzahl von 200 min^{-1} und Beschleunigung von $100 \text{ min}^{-1}/\text{s}$ für den Betriebsbereich des Drehzahlreglers transportiert. Zum Zeitpunkt $t_{PR}(p_{3R})$ erfolgt die Umschaltung zwischen DR und PR, weil die Bedingung $|x_{FB} - x_A| \leq \Delta x_A = 4 \text{ m}$ erfüllt ist und durch Q_R (vgl. Gleichung (5-4)) dem D_R bzw. dem PTR mitgeteilt wird. Hierbei handelt es sich um eine Mischung der hybriden Phänomene: gesteuerter Sprung und gesteuertes Umschalten (vgl. Abschnitt 5.1.1). Der Transport des Produktes endet, wenn die Sollposition $x_A^* = x_{FB}^* = 6 \text{ m}$ erreicht ist. Das reale System hat zum Zeitpunkt des Umschaltens ein deutlich größeres Überschwingen, welches auf die geringe Steifigkeit des mechanischen Aufbaus zurückzuführen ist. Zudem sind Abweichung in dem antriebsseitigen Lastmoment M_{FB} zu beobachten, weil dieses im Modell als Konstante aufgeschaltet wurde und im realen System der Lastmotor als Bremse betrieben wurde.

5.5 Produkttolerante Steuerung und Regelung am Beispiel eines Handlingsystems

Analog zum Vorgehen innerhalb des vorherigen Beispiels werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse für eine produkttolerante Steuer- und Regelung eines Handlingsystems innerhalb einer Fertigungszelle vorgestellt. Das Bild 5-13 a) zeigt ein Handlingsystem vom Typ EDP mini der Firma eps Automation. Über die zwei Linearmotoren¹² ist das System in der Lage eine maximale Masse von 3 kg zu bewegen. Im lastfreien Zustand können maximal 120 Hubbewegungen pro Minute ausgeführt werden [eps14].

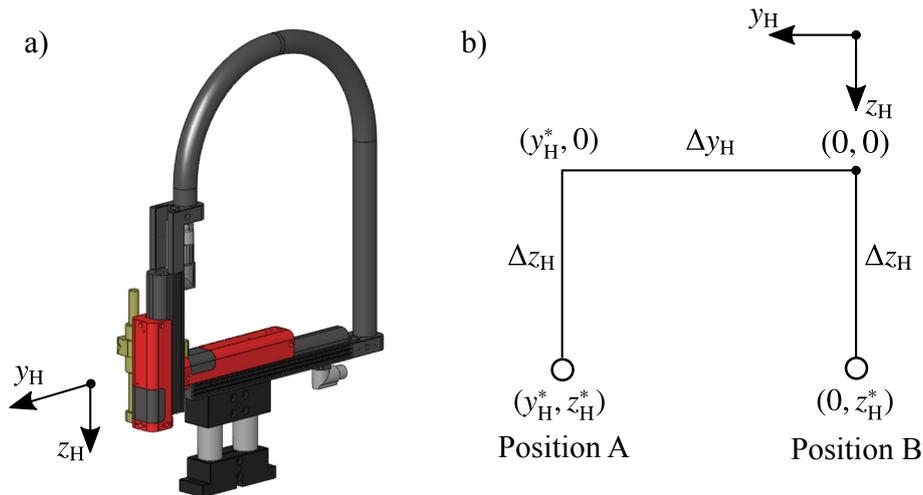


Bild 5-13: Handlingsystem für eine Fertigungszelle: a) EDP mini (Quelle: eps Automation / Afag Hardt GmbH) und b) produktabhängige Positionstrajektorie

Gemäß der Entwurfsphase **1** bzw. **1.1** soll auf Basis einer geeigneten Produktintelligenz die Positionsregelung der z-Achse derart anpasst werden, sodass ein Transport mit konstanter Geschwindigkeit ermöglicht wird. Hierfür wäre ebenfalls auch eine Optimierung hinsichtlich der maximalen Geschwindigkeit denkbar, wird allerdings an dieser Stelle nicht weiter verfolgt. Die Produktvarianz ΔP_v setzt sich im Wesentlichen aus der variierenden Masse m_p (0 – 3 kg) und einer variantenabhängigen Anfangs- und Endposition zusammen. Zur Erfüllung der Aufgaben bzw. des Entwurfsschrittes **1.2**, sind die Funktionalität der Flexibilitätsdimension sowie die Attribute Varianz und Beweglichkeit, entscheidend (vgl. Tabelle 2-1 und 2-2). Diese beschreiben die nach OSTGATHE benötigte Betriebsmittelflexibilität des Handlingsystems (siehe Tabelle 2-4).

In der zweiten Entwurfsphase **2** wurde das DSM und die Produktintelligenz in leicht abgeänderter Form aus dem vorherigen Beispiel (siehe Abschnitt 5.4) verwendet. Die Abweichungen im DSM fokussieren sich auf den Bereich des Produktgewichtes (0 bis 3 kg) und dem Modus, der in Abhängigkeit der Produktvariante (A, B und C) die gewünschte Solltrajektorie abbildet.

¹²Für die y-Achse wird ein Linearachse vom Typ EDM 20-200 EL (siehe Datenblatt im Anhang A1-7) und für die z-Achse vom Typ EDM 20-50 EL (siehe Datenblatt im Anhang A1-6) verwendet, welche auf Linearantrieben der Firma LinMot basieren [eps14] (siehe Datenblatt im Anhang A1-5).

Die für den Entwurfsschritte 3.1 geforderte produkttolerante Rekonfiguration für Off-board PINT wurde analog zu dem in Abschnitt 5.4 gezeigten Beispiel verwendet, allerdings handelt sich bei dem Handlingsystem um ein reines MATLAB/SIMULINK-Modell ohne realen Prüfstand. Das Modell besteht im Wesentlichen aus den Linearmotoren der x_H - und z_H -Achse. Als Kontaktpunkte zwischen dem zu transportierendem Produkt und beim Greifer der z_H -Achse sind die Positionen A und B vorgesehen. Durch die Produktmasse m_p verändert sich die Systemdynamik der Strecke und der Vorsteuerung, welches im Sinne der hybriden Phänomene (vgl. Abschnitt 5.1.1) annähernd einem gesteuerten Umschalten entspricht. Auf Basis einer Kraftkonstanten (12,5 N/A für die y_H -Achse und $c_z = 9$ N/A für die z_H -Achse) wird in Abhängigkeit der bewegten Masse, d.h. Eigenmasse und Produktmasse, die Beschleunigung, Geschwindigkeit sowie Position der jeweiligen Achse berechnet. In z-Richtung ist zur Kompensation der Gewichtskraft eine Rückstellfeder (Federsteifigkeit $c_F = 800$ N/m) verbaut, welche aufgrund der Dämpfung (10 Ns/m) das Systemverhalten beeinflusst. Für die y-Achse ergibt sich somit ein I-T₁ Systemverhalten [Föl13], welches durch einen PD-Positionsregler mit einer Bandbreite von 35 Hz bei einer Phasenreserve von 60° geregelt wird. Das P-T₂-Verhalten der z-Position wird mittels eines PID-Regler (ebenfalls Bandbreite 35 Hz mit einer Phasenreserve von 60°) eingeregelt. In Analogie zu den Gleichungen (5-1), (5-2) und (5-3) aus dem vorherigen Beispiel erfolgte beim NZM der Regelstrecke eine positionsabhängige Injektion und Quantisierung der aktuell bewegten Masse, die sich zusammensetzt aus der Eigenmasse des Motorläufers m_z und des Produktes m_p .

Gemäß des Schrittes 3.2 erfolgt als letztes der Entwurf des PTR, HR und des HRG. Auf Basis der über das DSM zur Verfügung gestellten Produktmasse führt der PTR eine produktbasierte Online-Rekonfiguration mittels einer Vorsteuerung¹³ (VS und VS_{PTR}) nach [Lin14; Lin08] durch, welche in Abhängigkeit des Sollwertes der Position z_H^*

$$i_{VS} = \overbrace{\frac{m_z}{c_z} \frac{d^2 z_H^*}{dt^2} + \frac{c_F \Delta z_H^*}{c_z} - \frac{m_z g}{c_z}}^{VS} + \overbrace{\frac{m_p}{c_z} \frac{d^2 z_H^*}{dt^2} - \frac{m_p g}{c_z}}^{VS_{PTR}} \quad (5-6)$$

a

b

c

d

e

die Beschleunigungs- und Bremsfahrten a, die Kompensation der Federkraft b und bewegte Eigenmasse des Motors c vorsteuert. Zusätzlich wird durch den PTR die produktabhängige Masse m_p über die Anteile d und e für jede unterschiedliche Variante vorgesteuert. Der Vorsteuerstrom i_{VS} nach Gleichung (5-6) wird der Stellgröße des PID-Reglers aufaddiert. Die Vorgabe der Position erfolgt mit einer maximalen Änderung von 400 mm/s. Zudem konfiguriert der PTR die produktabhängigen Sollwertvorgaben

$$(y_H^*, z_H^*) = \begin{cases} (100 \text{ mm}, 50 \text{ mm}), & \text{bei Variante A} \\ (150 \text{ mm}, 30 \text{ mm}), & \text{bei Variante B} \\ (200 \text{ mm}, 70 \text{ mm}), & \text{bei Variante C} \end{cases}$$

des HRG in Abhängigkeit der drei Produktvarianten. Zur weiteren Erläuterung des produkttoleranten Handlingsystems werden im Folgenden einige Simulationsergebnisse diskutiert.

¹³Die Steuerungs- und Regelung des realen Handlingsystems könnte bspw. mit einem Servoregler der Firma LinMot vom Typ B1100 realisiert werden.

Das Bild 5-14 zeigt die Positionstrajektorie der geregelten z-Linearachse für die Produktvariante A mit VS und VS_{PTR}. Bei dieser Untersuchung wurde die Produktmasse über das DSM von Null bis maximal 3 kg in einer 0,25 kg Quantisierung erhöht.

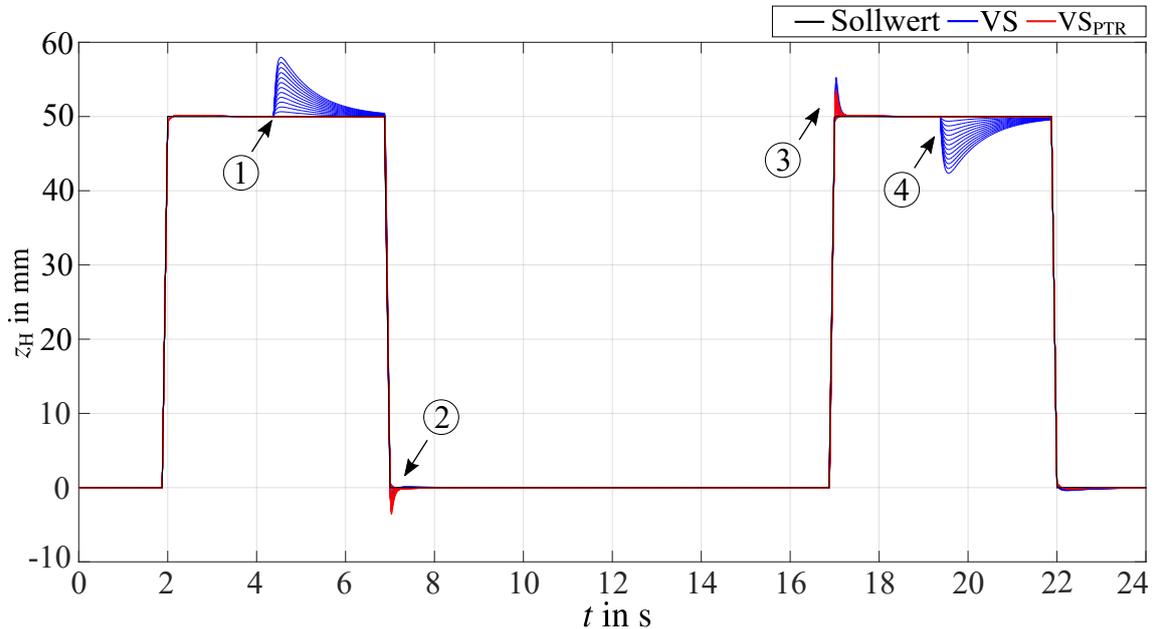


Bild 5-14: Positionierung eines Produktes der Variante A in Abhängigkeit des gesamten Massebereiches

Der Punkt ① zeigt die Reaktion des Positionsregelkreises mit VS und VS_{PTR} auf das Ankoppeln der freien Masse an das Handlingsystem. Im Falle der VS_{PTR} ist überhaupt kein Durchsacken des Handlingsystems zu beobachten. Bei der reinen VS hingegen erhöht sich das Durchsacken mit zunehmender Produktmasse.

Im Transportbereich mit Masse sind die Reaktionen des Handlingsystems von der Position $(y_H, z_H) = (100 \text{ mm}, 50 \text{ mm})$ auf $(y_H, z_H) = (100 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ mit ② und von $(y_H, z_H) = (0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ auf $(y_H, z_H) = (0 \text{ mm}, 50 \text{ mm})$ mit ③ markiert. In der Situation ② bewegt sich das System in negative z_H -Richtung und hebt somit das Produkt an. In der Situation ③ bewegt das Handlingsystem in positive z_H -Richtung um das Produkt abzusetzen.

Aus dem Verlauf der Positionstrajektorie im Punkt $(y_H, z_H) = (0 \text{ mm}, 50 \text{ mm})$ ist zudem an der Stelle ④ zu erkennen, dass im Falle des Abkoppelns der Produktmasse der Regelkreis mit normaler VS die Störung ausregeln muss, wohingegen die produkttolerante Vorsteuerung VS_{PTR} die Störung analog zu ① kompensiert.

Das Bild 5-15 a) zeigt eine zufällig generierte Folge an Produktvarianten, die durch das Handlingsystem bewegt werden müssen. Zur Erfüllung der Produktbedürfnisse muss der PTR neben der Vorsteuerung ebenfalls die gewünschte Trajektorie über den HRG an das aktuell zu transportierende Produkt anpassen. Die Soll- und Istwerte der z_H und y_H Position für die Produktfolge ist in den Bildern 5-15 b) und c) dargestellt.

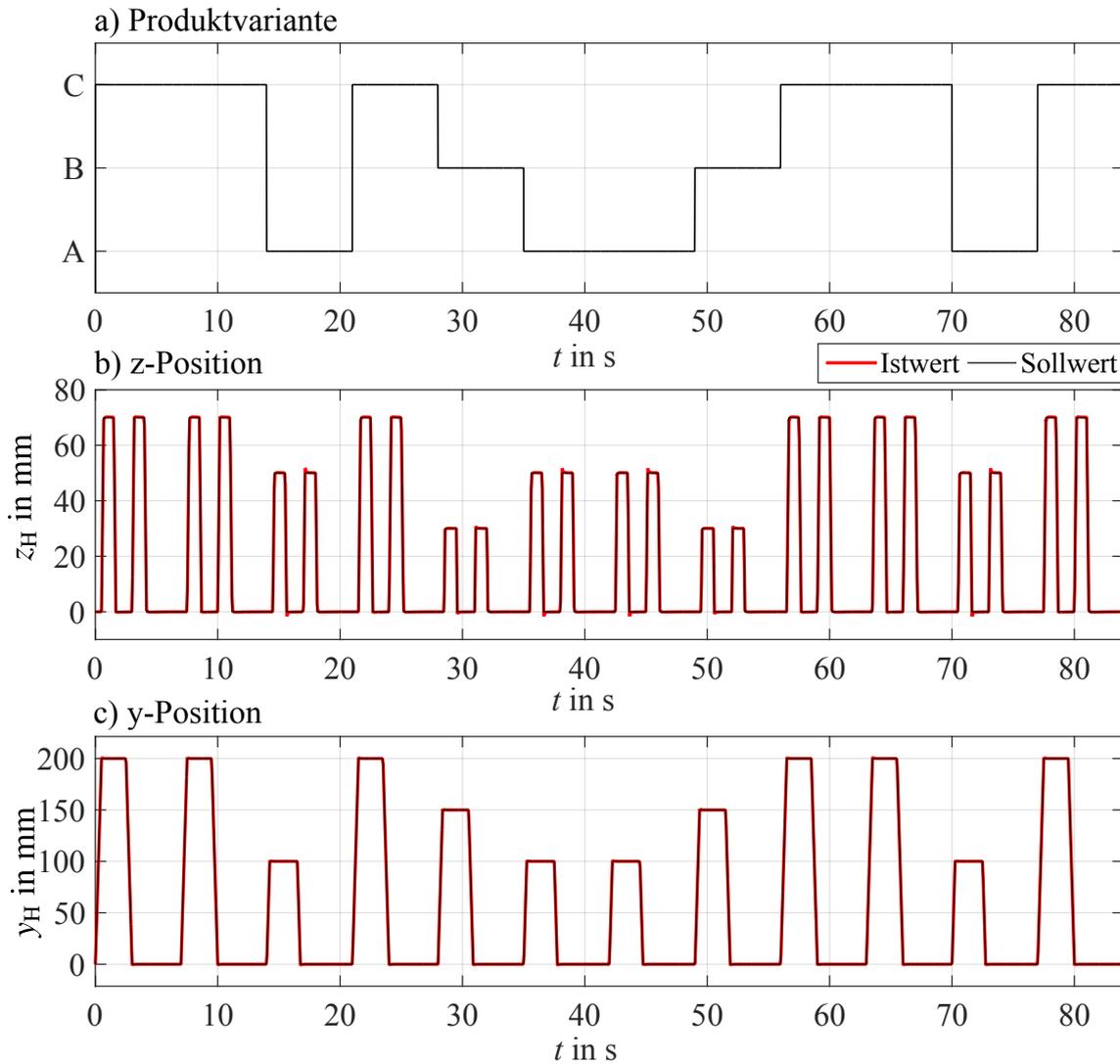


Bild 5-15: Produkt- und variantenabhängiger Transport mit dem Handlingsystem: a) Produktvariante, b) z_H -Position und c) y_H -Position.

Im Detail zeigen die Bilder 5-16 a), b) und c) die Dynamik der z-Achse in Abhängigkeit der Produktvariante und Masse. Durch die Erweiterung des Regelungskonzeptes um die produktabhängige Vorsteuerung sowie die dynamische Anpassung der Positionstrajektorie, kann eine Steigerung der Flexibilität gezeigt werden. Der PTR ist aufgrund der über das DSM gelieferten Informationen in der Lage die Dynamik des gesamten Handlingsystems innerhalb einer Ein-Stück-Fertigung flexibel anzupassen.

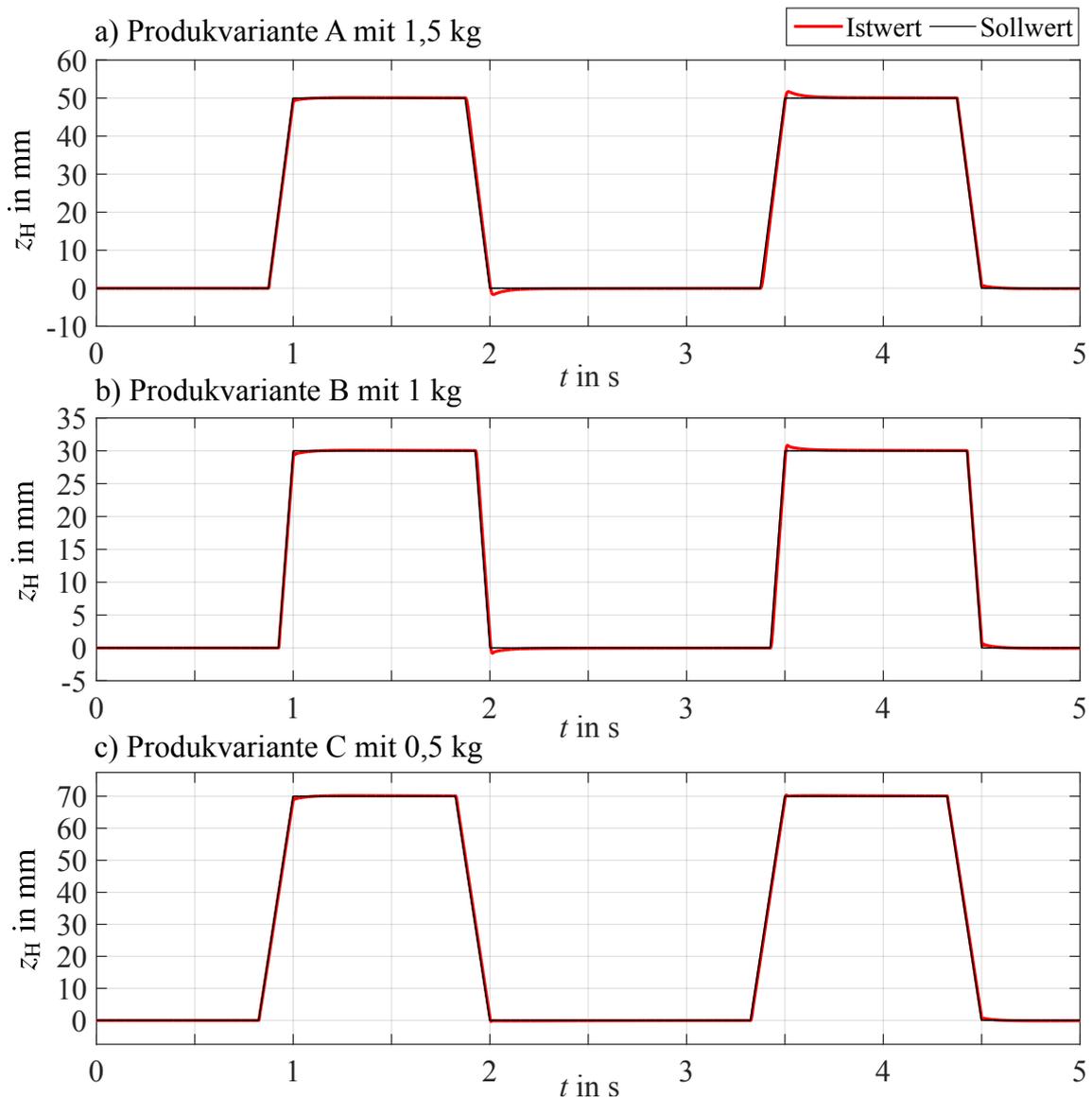


Bild 5-16: z_H -Position der drei Produktvarianten: a) Variante A mit 1,5 kg, b) Variante B mit 1 kg und c) Variante C mit 0,5 kg.

5.6 Fazit und Zusammenfassung

In diesem Kapitel ist ein Überblick über die Charakteristika und Beschreibungsformen von hybriden dynamischen Systemen gegeben worden. Auf Basis des ausgewählten Netz-Zustands-Modells wurde eine produkttolerante Steuer- und Regelung entwickelt, in dem gezielt intelligente Produkte und ein produkttoleranter Rekonfigurator integriert wurden. Neben der steuer- und regelungstechnischen Fragestellungen konnte die informationstechnische Kommunikation bzw. Interaktion im Falle von Off- und On-board PINT beantwortet werden. Zur systematischen Handhabung dieser Konzepte wurde ein Leitfaden entwickelt, der den Entwurfsprozess einer produkttoleranten Steuer- und Regelung beschreibt. Durch Anwendung in einem praxisnahen Anwendungsbeispiel konnte abschließend gezeigt werden, wie die Integration des PTR mit der produktgetriggerten Kommunikation, Rekonfiguration sowie Interaktion innerhalb einer hybriden Steuer- und Regelung

erfolgt. Hierdurch ist es möglich, die Vorteile einer hochflexiblen produktgesteuerten Fertigung bis auf die unterste steuer- und regelungstechnische Ebene in der Fertigungsautomation zu nutzen. In zwei industrienahen Anwendungsszenarien konnte in Form von MATLAB-Modellen und einem realen Prüfstand ein neuer technologischer Baustein zur Flexibilisierung im Sinne einer Ein-Stück Fertigung demonstriert werden, der die in Abschnitt 4.2 identifizierten Schnittmengen vereint und wesentliche Ziele dieser Arbeit erfüllt.

6 Dynamische Prozessplanung für produkttolerante und vernetzte Fertigungssysteme

Innerhalb dieses Kapitels werden die Grundlagen der dynamischen Prozessplanung für ein vernetztes Fertigungssystem erläutert, welches gemäß der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Definitionen und Anforderungen hinsichtlich der Produkttoleranz agieren soll. Klassische Verfahren, die eine Vorabplanung bei der Produktion von Großserien vornehmen und in [Sch06; Dan09; MKRW11] erläutert sind, eignen sich aufgrund der in Abschnitt 6.4 beschriebenen Anforderungen nicht, weil die Entscheidungen online und situationsbedingt in Abhängigkeit jedes einzelnen Produktes getroffen werden müssen. Hierdurch kann die Flexibilität des zellenbasierten Fertigungssystems, welche auf schnellen lokalen Entscheidungen basierend, gewährleistet werden. Nach den Grundlagen werden etablierte Verfahren aus dem Bereich der dynamischen Ablaufplanung vorgestellt und diskutiert. Diese sind grundlegend für das Verständnis des Standes der Wissenschaft und Technik sowie dessen Abgrenzung zu den Entwicklungen innerhalb dieser Arbeit.

6.1 Grundlagen der dynamischen Ablaufplanung

Die dynamische Ablaufplanung bzw. Zeitplanerstellung wird in der Fachliteratur oftmals mit dem englischen Begriff *Scheduling* beschrieben [Sta03]. Der eigentliche Planungsalgorithmus bzw. das Verfahren wird mit dem Begriff *Scheduler* bezeichnet [Sta03]. Ein Bestandteil des Scheduling sind Warteschlangen deren grundlegende Funktionalität mit der Warteschlangentheorie [Bau13] bzw. in englischsprachiger Fachliteratur mit *Queueing Theory* [Bha08; Gro08] beschrieben wird.

Ziel der dynamischen Ablaufplanung bzw. des Scheduling ist es zu bearbeitende Produkte einer Fertigungszelle oder Maschine auf Basis von dynamischen Prozessparametern so zuzuteilen, damit Systemziele, wie bspw. eine kurze Antwortzeit, hoher Fertigungsdurchsatz und eine hohe Auslastung der FZs bzw. Maschinen, erzielt werden können. Fundamental für alle nachfolgenden Betrachtungen sowie Definitionen ist die in Abschnitt 4.3 erläuterte und in Bild 4-2 dargestellte Topologie produktgesteuerter flexibler Fertigungsprozesse. Im Folgenden werden zunächst für das Scheduling essenzielle Zeitpunkte und Zeitspannen in Anlehnung an [But11] definiert, die immer individuell von dem zu fertigenden Produkt P_v abhängen:

- $t_0(P_v)$ - Ankunftszeitpunkt von P_v in der Warteschlange,
- $t_1(P_v)$ - Startzeitpunkt der Bearbeitung von P_v ,
- $t_2(P_v)$ - Istzeitpunkt bei dem die Bearbeitung von P_v abgeschlossen ist,
- $t_d(P_v)$ - Sollzeitpunkt bei dem die Bearbeitung von P_v abgeschlossen ist,
- $\tau_q(P_v)$ - Wartezeit von P_v in der Warteschlange,
- $\tau_\Sigma(P_v)$ - Bearbeitungszeit von P_v ,
- $\tau_r(P_v)$ - Zeitreserve zum geplanten Fertigstellungszeitpunkt von P_v ,
- $\tau_v(P_v)$ - Verspätung von P_v zum geplanten Fertigstellungszeitpunkt.

Das Bild 6-1 zeigt den Zusammenhang der zuvor definierten Größen für ein zu fertigendes Produkt P_v im a) nicht verspäteten und b) verspäteten Fall.

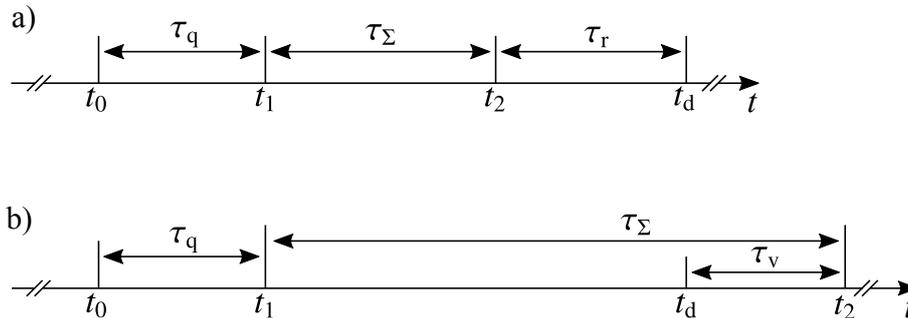


Bild 6-1: Definition von Zeitpunkten und Zeitspannen für ein zu fertigendes Produkt P_v für a) ein nicht verspätetes Produkt und b) ein verspätetes Produkt

Neben den zeitlichen Definitionen sind für das Verständnis unterschiedlicher Scheduling-Verfahren wichtige Fachbegriffe bzw. Charakteristika grundlegend, die im Folgenden in Anlehnung an [Sta03; But11] erläutert werden:

- Die **Antwortzeit** beschreibt die Zeitspanne zwischen dem Eintreffen eines Produktes in einer Warteschlange und der Fertigstellung, d.h. den Durchlauf des Produktes durch alle benötigten FZs.
- Die **Auslastung** einer Fertigungszelle oder Maschine beschreibt den prozentualen Anteil der Zeit, in der eine wertschöpfende Tätigkeit ausgeübt wird.
- Der **Durchsatz** beschreibt, wie viele Produkte von einer FZ oder Maschine innerhalb einer Zeiteinheit abgearbeitet werden können. Dieser hängt im Wesentlichen von der Systemtopologie der Fertigung und von der Scheduling-Strategie ab.
- Beim **Verhungern** kommt es bei einem gewählten Scheduling-Verfahren zu der Situation, dass ein Produkt aufgrund abweichender Ziele keiner FZ oder Maschine zugewiesen wird. Dies kann bspw. auftreten, wenn ein Verfahren Produkte mit einer kurzen Bearbeitungszeit bevorzugt und somit Produkte mit einer großen Bearbeitungszeit permanent warten.
- **Fairness** bedeutet, dass bei fehlenden Benutzer- und Systemvorgaben alle zu fertigenden Produkte gleich behandelt werden und somit kein **Verhungern** auftreten kann.
- Die **maximale Verspätung** beschreibt die Summe aller Verspätungen bzw. Verzögerungen, die ein zu fertigendes Produkt innerhalb einer Fertigung im schlechtesten Fall durchlaufen hat.
- Beim **unterbrechenden Scheduling** kann die Bearbeitung eines aktuell gefertigten Produktes zugunsten der Fertigung eines anderen Produktes unterbrochen werden. Bei der Unterbrechung wird auch oftmals von einer **Verdrängung** des Produktes gesprochen. Beim **nicht unterbrechendem Scheduling** wird immer die aktuelle Bearbeitung fertiggestellt, bevor ein neues Produkt zu einer FZ bzw. Maschine zugewiesen wird.
- Das **Altern** eines Produktes berücksichtigt die Aufenthaltsdauer innerhalb des Fertigungsprozesses und sorgt somit dafür, dass Produkte nicht **Verhungern** können.

- Beim Scheduling mit **Sollzeitpunkten** sollen die Produkte bis zu einem **fest definierten Zeitpunkt** fertiggestellt sein. Oftmals kommt es hierbei zur **Verdrängung** und/oder zum **Verhungern** von Produkten.

Neben den beschriebenen wesentlichen Merkmalen von Scheduling-Verfahren sind für die Analyse unterschiedlicher Verfahren quantifizierbare Kenngrößen grundlegend, welche im Folgenden erläutert werden.

Die Gleichung (6-1) beschreibt die Definition der Antwortzeit $\tau_a(P_\nu)$, d.h. die Zeit die ein Fertigungssystem zur Herstellung eines Produktes P_ν benötigt.

$$\tau_a(P_\nu) = t_2(P_\nu) - t_0(P_\nu) \quad (6-1)$$

Zur Bewertung und dem Vergleich unterschiedlicher Scheduling-Verfahren wird oftmals die in Gleichung (6-2) dargestellte mittlere Antwortzeit $\bar{\tau}_a$

$$\bar{\tau}_a = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} \tau_a(P_i)}{\nu} \quad (6-2)$$

berechnet [Sta03]. Hierbei wird die Summe der Antwortzeiten aller von einem Fertigungssystem hergestellten Produkte $i = 1 \dots \nu$ durch die Gesamtanzahl ν der gefertigten Produkte geteilt. Als Beurteilungsmaß für die Abweichung zwischen den einzelnen produktspezifischen Antwortzeiten zeigt die Gleichung (6-3) auf Basis der mittleren Antwortzeit die Berechnung der Standardabweichung

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{\nu - 1} \sum_{i=1}^{\nu} (\tau_a(P_i) - \bar{\tau}_a)^2} \quad (6-3)$$

für eine Fertigungssequenz. Die mittlere Antwortzeit kann ferner noch für die Bestimmung des prozentualen Beschleunigungsmaßes α verwendet werden [BBB15], dessen Berechnung in Gleichung (6-4) dargestellt ist. Für einen Vergleich zwischen zwei Scheduling-Verfahren A und B ergibt sich α zu:

$$\alpha_A^B = \frac{\bar{\tau}_a^A - \bar{\tau}_a^B}{\bar{\tau}_a^A} \cdot 100 \% \quad (6-4)$$

Basierend auf den zuvor erläuterten Grundlagen werden im nächsten Abschnitt unterschiedlichste Scheduling-Verfahren vorgestellt.

6.2 Strategien für die dynamische Ablaufplanung

Im folgenden Abschnitt werden 18 verschiedene Scheduling-Strategien vorgestellt und abschließend miteinander tabellarisch verglichen. Der größte Teil dieser Verfahren stammt ursprünglich aus dem Bereich der Arbeitsplanung eines Prozessorsystems, von denen bis dato nur wenige im Bereich der hochflexiblen Fertigungsplanung zur Anwendung kamen. Hierbei handelt es sich um:

- **First Come First Served (FCFS)** stellt die einfachste Scheduling-Strategie dar, die oftmals auch als First In First Out Strategie oder auch strenges Warteschlangenverfahren bezeichnet wird [Sta03]. Hierbei wird immer das Produkt ausgewählt,

welches bereits am längsten innerhalb der Warteschlange wartet. FCFS arbeitet nicht verdrängend und beachtet keine individuellen Prioritäten, ist jedoch ein faires Verfahren, welches immer das zu fertigende Produkt mit der längsten Wartezeit auswählt [Sta03; LI11].

- **Last Come First Served (LCFS)** bildet das Gegenstück zum FCFS Auswahlverfahren. Hierbei wird immer das zu fertigende Produkt ausgewählt, welches als letztes in der Warteschlange eingetroffen ist. Dieses ebenfalls sehr einfach zu implementierende Verfahren berücksichtigt ebenfalls keine Prioritäten und ist sowohl mit als auch ohne Verdrängung vorstellbar [CMM67].
- **Shortest Process Next (SPN)** ist ein nicht verdrängendes Scheduling-Verfahren, bei dem immer das zu fertigende Produkt mit der kürzesten Prozesszeit ausgewählt wird. Der SPN Scheduler ist optimal hinsichtlich der mittleren Antwortzeit, hat allerdings den Nachteil, dass Produkte mit langer Wartezeit verhungern können [CMM67; LI11; Sta03].
- **Longest Process Next (LPN)** bildet das Gegenstück zum SPN-Verfahren. Hierbei wird das Produkt mit der größten Bearbeitungszeit ausgewählt. Das LPN-Verfahren ist hinsichtlich der mittleren Antwortzeit nicht mehr optimal und die Produkte können ebenfalls weiterhin verhungern [CMM67].
- **Shortest Remaining Time (SRT)** ist die unterbrechende Variante des SPN Auswahlverfahrens. Der SRT-Scheduler wählt dabei immer das zu fertigende Produkt aus, dessen verbleibende Bearbeitungszeit am Kürzesten ist. Bei diesem Verfahren können ebenfalls Produkte verhungern [LI11; Sta03].
- **Highest Response Ratio Next (HRRN)** Scheduler kompensiert den wesentlichen Nachteil des Verhungers vom SPN Auswahlverfahren, durch Altern der zu fertigenden Produkte. Hierfür berechnet der HRRN Scheduler einen Antwortquotienten für jedes Produkt, wobei immer die Produktinstanz mit dem höchsten Quotienten ausgewählt wird. Begonnene Fertigungsprozesse werden hierbei nicht unterbrochen [Sta03; LI11].
- **Round Robin (RR)** wird oftmals auch Zeitscheibenverfahren bezeichnet, da es jedes zu fertigende Produkt innerhalb derselben Zeitscheibe bearbeiten lässt und es danach für das nächste Produkt unterbricht und hinten anstellt (nach FCFS Verfahren). RR ist fair gegenüber Produkten mit kurzer Bearbeitungszeit, im Vergleich zum FCFS, da Produkte mit langen Bearbeitungszeiten dieselbe Ausführungszeit zugeteilt bekommen [Sta03].
- **Earliest Arrival Time (EAT)** ähnelt vom Prinzip dem FCFS, allerdings wird in der Abarbeitung von Produkten mit gleicher Ankunftszeit unterschieden. Bei dem FCFS ist das Verhalten in dieser Situation unbestimmt. Beim EAT hingegen wird in diesem Fall die Gesamtbearbeitungszeit der Produkte betrachtet und dem Produkt mit der kürzesten Gesamtbearbeitungszeit Vorrang gewährt [CSO⁺06].
- **Most Work Remaining (MWKR)** ist ein nicht unterbrechendes Auswahlverfahren, beim dem immer das Produkt mit der am meisten verbleibenden Bearbeitungszeit ausgewählt wird [CMM67; CSO⁺06].
- **Least Work Remaining (LWKR)** ist wie der MWKR ein nicht unterbrechendes Scheduling-Verfahren, welches immer das Produkt mit der wenigsten verbleibenden

Bearbeitungszeit auswählt [CMM67; CSO⁺06].

- **Earliest Due Date (EDD)** ist ein nicht verdrängendes Verfahren, welches zu fertigende Produkte nach aufsteigenden Sollzeitpunkten sortiert. Somit wird immer das zu fertigende Produkt mit dem frühesten Sollzeitpunkt ausgewählt. Das EDD-Verfahren ist minimal bezüglich der maximalen Verspätung¹⁴, jedoch nur wenn alle Produkte dieselbe Ankunftszeitpunkt aufweisen [CMM67; Sta03; But11].
- Das **Earliest Deadline First (EDF)** Verfahren ist die verdrängende Variante des EDD-Schedulers. Bei dieser Scheduling-Strategie wird immer das zu fertigende Produkt ausgewählt, welches den frühesten Sollzeitpunkt besitzt. Weiterhin minimal ist das EDF-Verfahren ebenso, wie der EDD hinsichtlich der maximalen Verspätung¹⁵ [But11].
- Das **Latest Deadline First (LDF)** Verfahren wählt immer das zu fertigende Produkt mit dem aktuell spätesten Sollzeitpunkt. Es existiert in einer verdrängenden und nicht verdrängenden Variante [But11].
- Beim **Non-preemptive Priority Discipline (Prio-NP)** Verfahren werden die zu fertigenden Produkte in Klassen unterteilt, wobei die erste Klasse die höchste Priorität repräsentiert. Für jede weitere Klasse werden Bereiche definiert, in denen sich die Bearbeitungszeiten befinden dürfen. Die Abarbeitung der einzelnen Klassen erfolgt nach dem FCFS Prinzip, wobei immer die Klasse mit der höchsten Priorität in einem nicht verdrängendem Ablauf bearbeitet wird [CMM67].
- **Preemptive Priority Discipline (Prio-P)** ähnelt dem Prio-NP Verfahren, allerdings werden aktuell bearbeitete Produkte zugunsten von neuen Produkten mit höherer Priorität verdrängt [CMM67].
- **Multi-Level Priority Disciplines (MLPD)** ist eine Erweiterung der Prio-NP und Prio-P Scheduling-Verfahren mit dem Unterschied, dass die einzelnen Klassen hierbei nicht nur nach der Bearbeitungszeit kategorisiert werden, sondern auch nach weiteren Kriterien wie bspw. der Wartezeit [CMM67].
- **Time Scheduling (TLS)** bezeichnet ein vorberechnetes Scheduling-Verfahren, bei dem analog zum RR, Zeitabschnitte für die Abarbeitung der Produkte definiert werden. Anschließend werden die Produkte einzelnen Zeitabschnitten zugeordnet, wobei es möglich ist, dass sich mehrere zu fertigende Produkte innerhalb einer Zeitscheibe befinden. Das TLS-Verfahren eignet sich vor allem für periodisch wiederkehrende Produktvarianten [But11].
- **Service in Random Order (SIRO)** wählt die zu fertigenden Produkte zufällig aus. Hierbei kann die Zuweisung durch Parameter bestimmt werden, die nicht abhängig von der Bearbeitungszeit sind, wie bspw. ein unabhängiger Sollzeitpunkt. Die erwartete mittlere Antwortzeit kann statistisch in Abhängigkeit der Produktanzahl durch den Erwartungswert berechnet werden [CMM67].

Die nachfolgende Tabelle 6-1 wurde auf Basis von [CMM67], [Sta03], [CSO⁺06], [LI11], [But11] und [Pol16] erstellt.

¹⁴Siehe hierfür JACKSON-Theorem [CMM67, S.30] oder [But11, S.55]

¹⁵Siehe hierfür HORN-Theorem [But11, S.59]

Tabelle 6-1: Übersicht verschiedener Planungsverfahren

Verfahren	Auswahl- funktion Λ_s	Verhungern	Unter- brechend	Besonderheit
FCFS	$\min(t_0)$	nein	nein	Geringe Komplexität, benachteiligt geringe τ_Σ .
LCFS	$\max(t_0)$	ja	beides	Geringe Komplexität, benachteiligt geringe u. lange τ_Σ .
SPN	$\min(\tau_\Sigma)$	ja	nein	Optimal hinsichtlich $\bar{\tau}_a$, benachteiligt lange τ_Σ .
LPN	$\max(\tau_\Sigma)$	ja	nein	Benachteiligt geringe τ_Σ .
SRT	$\min(\tau_\Sigma(t_2 - t))$	ja	ja	Benachteiligt lange τ_Σ .
HRRN	$\max(\frac{\tau_q + \tau_\Sigma}{\tau_\Sigma})$	nein	nein	Gute Lastverteilung, nicht verhungender SPN durch Altern der Produktinstanzen.
RR	(*)	nein	ja	Gleichbehandlung aller Produkte, unterbricht jede Fertigung nach bestimmter Zeitdauer.
EAT	$\min(t_0)$	nein	nein	Bevorzugt geringe τ_Σ bei gleicher t_0 .
MWKR	$\max(\tau_\Sigma(t_2 - t))$	ja	nein	Bevorzugt lange τ_Σ .
LWKR	$\min(\tau_\Sigma(t_2 - t))$	ja	nein	Bevorzugt geringe τ_Σ .
EDD	$\min(t_d)$	nein	nein	Benachteiligt Produkte mit spätem t_d
EDF	$\min(t_d)$	nein	ja	Benachteiligt Produkte mit spätem t_d und minimiert die maximale Verspätung.
LDF	$\max(t_d)$	ja	beides	Benachteiligt Produkte mit frühem t_d .
Prio-NP	(*)	ja	nein	Bevorzugt Produkte mit höchster Priorität und benutzt FCFS für Produkte mit selber Priorität.
Prio-P	(*)	ja	ja	Bevorzugt Produkte mit höchster Priorität und benutzt FCFS für Produkte mit selber Priorität.
MLPD	(*)	ja	beides	Erweiterung des Prio-NP und Prio-P, wobei die Kategorisierung der Klassen durch Kriterien ergänzt werden kann.
TLS	(*)	nein	beides	Zyklische Tasks werden, wenn möglich, eingehalten.
SIRO	Zufall	nein	nein	Verhungern von Produkten ist nur bei Gleichverteilung ausgeschlossen.

(*) : Nicht einfach darstellbar.

Sie zeigt einen Vergleich der zuvor beschriebenen Scheduling-Verfahren hinsichtlich ihrer mathematischen Auswahlfunktion Λ_s des Schedulers, des Verhungerns, möglicher Unterbrechungen bzw. Verdrängung von Produkten und einiger besonderer Merkmale. Die Notation bezieht sich auf die in Abschnitt 6.1 erläuterten Grundlagen und Definitionen, allerdings wurde die Abhängigkeit des Produktes P_v aufgrund einer besseren Illustration und Allgemeingültigkeit vernachlässigt. Bei der Auswahlfunktion der Scheduling-Verfahren SRT, MWKR und LWKR beschreibt $\tau_\Sigma(t_2 - t)$ die noch verbleibende Bearbeitungszeit des Produktes innerhalb des Fertigungsprozesses bzw. Herstellungsschrittes.

Dieser Abschnitt lieferte einen funktionalen Überblick über verschiedenste Scheduling-Strategien. Eine systematische Auswahl eines oder mehrerer Verfahren zur Handhabung der in Abschnitt 4.4.2 definierten Anforderungen in der in Abschnitt 4.3 vorgestellten Systemtopologie wird im Folgenden erläutert.

6.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Innerhalb dieses Abschnittes wird insbesondere der Stand der Wissenschaft und Technik beschrieben, der sich in der Überlappung der Themenbereiche 2. FMS und RMS, 3. Fertigungsplanung (vgl. Bild 4-1) im Abschnitt 4.2 und der Schnittmenge \textcircled{d} befindet, die sich im Wesentlichen mit der dynamischen Prozessplanung für vernetzte Fertigungssysteme beschäftigt.

BADR und GÖHNER präsentieren in [BG09] eine modellbasiert entwickelte Multiagentenarchitektur für die Ablaufplanung unter Berücksichtigung der typischen Systemtopologie von FMS. Hierbei lag der Fokus vor allem auf der Entwicklung eines hochflexiblen Multiagentensystems, welches es ermöglicht die im Fertigungsprozess zur Verfügung stehenden Ressourcen wie bspw. eine computergestützte Frästation oder Transportapplikationen dynamisch innerhalb der Planung zu allokkieren. Nach welchen Verfahren und Randbedingungen die eigentliche Ablaufplanung erfolgen sollte, war nicht Bestandteil dieser Veröffentlichung.

Mit einer Multiagentenplattform, einem Rückverfolgungsscheduler und einem künstlichen neuronalen Netz für die dezentrale Entscheidungsfindung zeigten MORARIU et al. simulative Resultate eines produktgesteuerten Prozesses und skizzierten Anforderungen der Agentenverarbeitung während des Produktlebenszyklus [MRMB14]. Das neuronale Netz ist mit dem Ressourcenmanagement verbunden, welches einen Überblick über die Fertigungsressourcen und die Produktwarteschlangen hat. Der Ausgang repräsentiert die Entscheidung, welche Ressource als Nächstes ausgewählt werden soll.

In [HR15] stellten HEES und REINHART einen neuartigen Ansatz einer Produktionsplanungssoftware für rekonfigurierbare Fertigungssysteme vor. Dieser besteht im Wesentlichen aus Datenmodellen, einem Konfigurationsmanagement und einer Ressourcenplanung. Eine konkrete Planung, d.h. die Allokation von variierenden Produkten auf FZs hinsichtlich unterschiedlicher Ziele wird allerdings nicht beschrieben.

SUGIMURA et al. stellen in [SSI03] einen Ansatz zur Fertigungsplanung innerhalb eines holonischen Herstellungsprozesses, bestehend aus Maschinen, Fertigungsstationen, Eingangs- sowie Ausgangspuffern und autonomen Transportfahrzeugen, vor. Im Wesentlichen wird hierbei der gesamte Prozess in die Zustände des Produkttransports, der Teilemontage,

der Maschinentätigkeiten und der Wartezeit aufgeteilt. Die Maschinen verfügen in diesem Szenario über unterschiedliche Fähigkeiten. Zur Prozessplanung wurde eine Methode entwickelt, die auf Basis von genetischen Algorithmen und der dynamischen Programmierung Maschinensequenzen der Maschinenfeatures vorausberechnet. Hierbei wurde eine gewichtete Kostenfunktion hinsichtlich der Bearbeitungszeit und Maschinenkosten minimiert. Abschließend wurden die Algorithmen prototypisch implementiert und die Effekte unterschiedlichster Gewichtungsfaktoren getestet.

Einen ähnlichen Ansatz mit adaptiven genetischen Algorithmen verfolgten MORANDIN et al. in [MSD⁺08], die zur Planung des Prozessablaufes verwendet werden. Hierfür wurde vorab ein Optimierungsproblem, welches die minimale Fertigungsdauer sucht, gelöst. Zuletzt wurde der adaptive mit dem klassischen genetischen Algorithmus verglichen, wobei eine Verringerung der Fertigungsdauer von bis zu 62 % erzielt werden konnte.

Ebenfalls über einen genetischen Algorithmus präsentieren ZHONGHUA und ZHIMING in [ZZ04] eine Planungsmethode, welche mittels dynamischer Graphen und Token die Planung für einen Herstellungsprozess im Voraus ermöglicht.

In [AN15] modellierten AZAB und NADERI die Produktionsplanung für ein rekonfigurierbares Fertigungssystem. Innerhalb dieses Modells wurde ein Fertigungssystem, bestehend aus einem Satz von Maschinen, modelliert, welches zur Herstellung einer Produktfamilie mit großer Variantenvielfalt verwendet wird. Hierbei wurde herausgefunden, dass der Rüstaufwand der Maschinen im Wesentlichen von der Konfigurationsvergangenheit der Maschinen und der Produktvielfalt abhängt. Hinsichtlich dieser Einflussgrößen konnte durch Simulationen die Produktionsdauer minimiert werden, indem ein optimierter Produktionsablauf im Voraus berechnet wurde. Das Autorenkollektiv präsentierte zudem in [NA15] einen Modellierungs- und Planungsansatz für flexible Fertigungszellen mit einer parallelen Abarbeitungsfähigkeit, am Beispiel einer computergestützten Bohr-/Frässtation. Zur Validierung des Modells wurden fünf etablierte Planungsalgorithmen implementiert und simulativ miteinander verglichen.

Für die Halbleiterbauelement-Herstellung entwickelten CHENG et al. in [CSO⁺06] eine Methode zur dynamischen Neuplanung des Fertigungsablaufes in Echtzeit. Im Wesentlichen liegt der Fokus des Ansatzes auf einer möglichst schnellen Neuplanung des Ablaufes für den Fall einer Störung bspw. des Ausfalls einer Prozessstation. Hierbei wird innerhalb eines disjunkten Graphen nach alternativen Fertigungsstationen gesucht und die Warteschlangenreihenfolge in Abhängigkeit des Ankunftszeitpunktes vom jeweiligen Los angepasst. Bei einem Vergleich mit anderen Verfahren wurde gezeigt, dass es sich um einen sehr einfach zu implementieren Algorithmus handelt, der innerhalb von einer Sekunde auf Störungen reagieren kann.

Über einen heuristischen Ansatz konzipierten WANG et al. in [CGW05] einen Planungsalgorithmus für flexible Fertigungssysteme mit partiell überlappenden Maschinenfähigkeiten. Der mehrstufige Ansatz besteht grundsätzlich aus einer Kombination des LPN- und des EDD-Verfahrens. Hierdurch konnte simulativ eine durchschnittliche Verringerung der Fertigungsdauer von 30 % im Vergleich zum herkömmlichen LPN Verfahren gezeigt werden.

Zur Identifikation von Produktionsengpässen innerhalb eines flexiblen Fertigungssystems entwickelten EL-TAMIMI et al. in [EAMA12] ein PETRI-Netz basiertes Simulationswerkzeug,

welches mittels unterschiedlicher zu fertigender Produktsequenzen potenzielle Flaschenhälse innerhalb einer verteilten flexiblen Fertigung aufdeckt. Die Planung und Verteilung der Produkte war in diesem Fall kein Bestandteil der Untersuchungen.

NOVAS und HENNING präsentierten in [NH14] einen constraint-basierten Programmieransatz für eine integrierte Ablaufplanung von ressourcenbeschränkten FMS. Innerhalb des Ansatzes wurden die aktuelle Maschinenauslastung, Ablaufplanung, Teiledistribution, Planung der Maschinenpuffer und benötigten Werkzeuge vorgenommen. Der Algorithmus liefert vorab eine Menge von möglicher Prozesskonfigurationen zu unterschiedlichen Zeitpunkten, von denen eine hinsichtlich gewünschter Kriterien ausgewählt werden muss. Die Funktion des Ansatzes wird innerhalb einer Simulationsstudie untersucht.

Durch eine PETRI-Netz basierte Methode zur Prozessplanung erhöhten GAMBOA QUINTANILLA et al. in [GCLC16] die Flexibilität bei einem diensteorientierten Herstellungsprozess. Durch Betrachtung aller möglichen Produktvarianten (verschiedenste Konstellation von montierten LEGO®-Bausteinen) wurden alle möglichen Wege der Produkte durch die zellenbasierte Fertigung abgebildet. Innerhalb der Transitionen wurden die Prozess- und Ressourcenbeschränkungen berücksichtigt. Hierdurch ist es möglich, immer in Abhängigkeit des Prozesszustandes eine Konfiguration für das jeweilige zu fertigende Produkt zu wählen.

LATIP und IDRIS untersuchten in [LI11] erstmals die Verwendung eines HRRN Verfahrens zur Ablaufplanung in verteilten Prozessen. Diesen verglichen sie mit einem FCFS Verfahren und stellten durch einfache Simulationsstudien fest, dass die Gesamtwartezeit des Prozesses durch den HRRN um 5 % reduziert werden konnte.

Einen dienstebasierten Ansatz zur optimierten Planung eines zellenbasierten Fertigungsprozesses mittels lernender intelligenter Produktagenten zeigen BOUAZZA et al. in [BTT15]. Der Produktagent lernt hierbei selbstständig mittels eines Q-learning Algorithmus und durch Dienstanfragen seinen eigenen Fertigungsprozess. Die eigentliche Planung wurde als eine Kombination der Verfahren FCFS und SPN implementiert. Über den Produktagenten wurde dynamisch und je nach Prozesssituation zwischen dem FCFS und dem SPN Auswahlverfahren zur Prozessplanung umgeschaltet. Simulativ wurde gezeigt, dass die Lösung in gewissen Prozesssituationen dem reinen FCFS und SPN überlegen ist.

Aus dem Stand der Technik gehen keine eindeutigen Anforderungen oder Richtlinien für eine dynamische Fertigungsplanung von FMS mit integrierter PINT hervor. Im Folgenden werden diese für ein produkttolerantes Fertigungssystem formuliert.

6.4 Anforderungen an eine dynamische Prozessplanung für produkttolerante und vernetzte Fertigungssysteme

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an ein produktabhängiges Ressourcenmanagement, welches zuvor unter der Anforderung $A_{PT,8}$ im Abschnitt 4.4 definiert wurde, unter Berücksichtigung der anderen Anforderungen $A_{PT,1}$ bis $A_{PT,7}$ und der in Bild 4-2 gezeigten Systemtopologie eines produkttoleranten vernetzten Fertigungssystem, weiter spezifiziert:

- Möglichst hohe **Zellen- und Maschinenauslastung**.

- Geringe **Prozessantwortzeiten** (vgl. Gleichungen (6-1) und (6-2)).
- Reduzierung von **Prozesswartezeiten** innerhalb der globalen und zellinternen **Warteschlangen**.
- **Ausnutzung** von parallelen **Zell- und Maschinentopologien** mit gleichen oder teilweise überlappenden Fähigkeiten. Des Weiteren müssen Ressourcenbeschränkungen beachtet werden.
- **Kein Verhungern** von Produkten bzw. Aufträgen.
- **Integration** von **intelligenten Produkten** gemäß der in Kapitel 3 vorgestellten Definitionen.
- **Berücksichtigung** von Produkten mit **hoher Variantenvielfalt**.
- Berücksichtigung von **variierenden Losgrößen**, bis hin zur Einzelstückfertigung.
- Berücksichtigung von **dynamischen Kunden- bzw. Produktprioritäten**, die sich während des gesamten Fertigungsprozesses ändern können.
- FMS und RMS verfügen über die Fähigkeiten ihre Werkzeuge zu Wechseln um die Produktvarianz abdecken zu können. Die Anzahl der **Werkzeugwechsel** muss möglichst **gering** sein, weil sie keine wertschöpfende Tätigkeit darstellen.
- **Keine Verdrängung** bzw. **Unterbrechung** von laufenden Prozessschritten zugunsten eines anderen Produktes bzw. Kundenauftrages.
- **Online Planungsverfahren**, welches nicht vorausberechnet wurde, sondern in **Echtzeit** auf sich verändernde Prozessbedingungen wie bspw. geänderte Produktprioritäten, -mengen und -varianten reagieren kann.
- Planung **ohne Sollzeitpunkte**, da der exakte Fertigungsendzeitpunkt nicht bekannt ist. (vgl. Tabelle 6-1).

Auf Basis der detaillierten Spezifikation der Anforderung $A_{PT,8}$ werden im Folgenden die Abschnitte 6.2 und 6.3 näher diskutiert.

6.5 Zwischenfazit und Abgrenzung zum Stand der Wissenschaft und Technik

Nachfolgend wird der Stand der Wissenschaft und Technik aus Abschnitt 6.2 sowie 6.3 unter Hinzunahme der im vorherigen Abschnitt 6.4 definierten Anforderungen diskutiert.

In den Werken [BG09], [MRMB14] und [HR15] wurden konzeptionelle Ansätze, Methoden und Softwarearchitekturen besprochen, wie zukünftige agentenbasierte dynamische Planungsverfahren für FMS bzw. RMS realisiert werden können. Jedoch wurden keine konkreten Ansätze zur dynamischen Lösung von Schedulingproblemen innerhalb eines verteilten und vernetzten Fertigungssystems dargestellt.

Die Autoren der Werke [SSI03], [ZZ04] und [MSD⁺08] präsentieren alle Planungsverfahren, deren Grundlage ein genetischer Algorithmus ist, der durch unterschiedliche Erweiterungen für das Scheduling von Fertigungssystemen eingesetzt werden kann. Unklar ist jedoch, ob bei diesen Konzepten gewährleistet werden kann, dass es nicht zum Verhungern

und/oder Verdrängen von Produktaufträgen kommen kann. Zudem wurde nicht gezeigt, ob die Verfahren online-fähig und in Echtzeit auf variierende Losgrößen und dynamische Prioritäten von Aufträgen reagieren können.

Im Wesentlichen zeigten AZAB und NADERI in [AN15; NA15] einen Modellierungsansatz von RMS, der als Grundlage für eine Produktionsplanung dient. Mit Hilfe des Modells untersuchten sie fünf unterschiedliche Suchalgorithmen und verglichen diese. Ebenso wie bei [SSI03], [ZZ04] und [MSD⁺08] bleibt unklar, ob Produkte verhungern und/oder verdrängt werden können. Des Weiteren gab es keinen Beweis über eine Echtzeitfähigkeit und einen Umgang mit variierenden Produkteigenschaften.

Das von CHENG et al. in [CSO⁺06] vorgestellte Verfahren findet Lösungen für verteilte flexible Fertigungssysteme, für den Fall des Ausfalls einer Fertigungszelle. Unklar ist jedoch, ob dieses Verfahren für eine komplette dynamische Fertigungsplanung mit großer Produktvielfalt verwendet werden kann, ohne dass es zum Verhungern und/oder Verdrängen von Aufträgen kommt.

Der in [CGW05] präsentierte Ansatz basiert auf einer Kombination des LPN und EDD. Hierbei kann es zum Verhungern von Produkten kommen und es müssen Sollzeitpunkte eingehalten werden. Dieses kollidiert mit den in Abschnitt 6.4 aufgestellten Anforderungen.

Der Planungsansatz von NOVAS und HENNING in [NH14] wird vorab anhand eines gegebenen Fertigungsszenarios berechnet und liefert nicht echtzeitfähig mehrere mögliche Fertigungsabläufe für ein flexibles Fertigungssystem. Hierbei obliegt es dem Anwender, welche Scheduling-Variante verwendet werden soll. Für ein voll automatisiertes FMS oder RMS muss dieser Ansatz noch weiter hinsichtlich Autonomie und Online-Fähigkeit ausdetailliert werden.

Die PETRI-Netz basierten Methoden zur Fertigungsplanung aus [GCLC16] und [EAMA12] sind im Vergleich zu allen anderen bereits vorgestellten Ansätzen als sehr statisch anzusehen, da auf Basis von zuvor fest definierten Produktvarianten sämtliche möglichen Kombinationen der Fertigungsabläufe vorab über PETRI-Netze abgebildet werden. Hierbei stellt sich die Frage, wie in diesem Ansatz die Flexibilität, d.h. die Reaktionsfähigkeit des Prozesses auf Änderungen (vgl. Abschnitt 2.1) gewährleistet werden kann.

BOUAZZA et al. zeigen in [BTT15] einen Ansatz zur Integration von intelligenten Produkten als selbst lernender Agent innerhalb der Fertigungsplanung. Allerdings wurden die eigentlichen dynamischen Planungsaufgaben für die Fertigung über eine Kombination aus dem FCFS und den SPN Verfahren umgesetzt. FCFS bietet wenig Flexibilität und beim SPN Scheduler kann es zum Verhungern von Aufträgen kommen, somit kommt dieser Ansatz aufgrund der Anforderungen in Abschnitt 6.4 nicht infrage.

In [LI11] verwendeten LATIP et al. erstmals ein HRRN Planungsverfahren (vgl. Abschnitt 6.2) für ein Szenario außerhalb eines Prozessors und verglichen dieses mit dem FCFS Verfahren. Das HRRN Verfahren hat eine gute Lastverteilung und es kommt nicht zur Verdrängung bzw. Verhungern von Produktaufträgen. Allerdings wurde innerhalb dieser Studie nicht untersucht, wie der HRRN für eine zellenbasierte Fertigungstopologie mit integrierten intelligenten Produkten verwendet werden kann. Zudem lag der Fokus nicht in der Berücksichtigung von Produkten mit hoher Variantenvielfalt und variierenden Losgrößen, der Integration von dynamischen Auftrags- bzw. Produktprioritäten und der

Berücksichtigung von flexiblen Maschinenfähigkeiten die Werkzeugwechsel zur Folge haben. Von allen in Abschnitt 6.3 vorgestellten Verfahren, Methoden und Konzepten scheint eine Weiterentwicklung des HRRN Verfahrens für die dynamische Prozessplanung eines produkttoleranten und vernetzten Fertigungssystems am zielführendsten. Zur Absicherung dieser Annahme wurden alle aus dem Abschnitt 6.2 vorgestellten Strategien hinsichtlich ihrer Eignung untersucht. Das Bild 6-2 zeigt die aus Tabelle 6-1 bekannten Scheduler als Mengendarstellung.

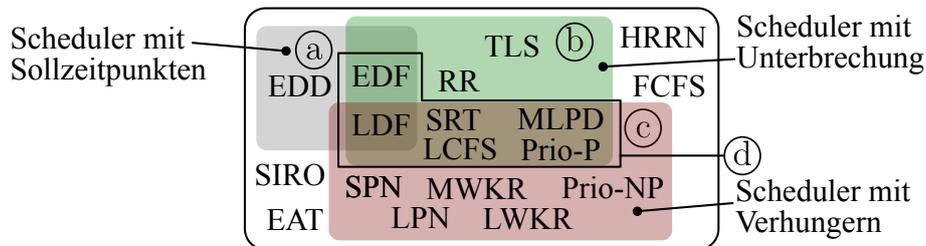


Bild 6-2: Eignungsanalyse unterschiedlicher Scheduling-Verfahren für die produkttolerante dynamische Fertigungsplanung

Aus den Anforderungen in Abschnitt 6.4 geht hervor, dass die Planungsverfahren nicht mit einem geplanten **Sollzeitpunkt** (siehe (a) in Bild 6-2) arbeiten sollen, da der exakte Fertigstellungszeitpunkt oftmals unbekannt ist und Produkte mit spätem Sollzeitpunkt vernachlässigt werden. Zudem darf es nicht zum **Verhungern** (siehe (c) in Bild 6-2) von Aufträgen oder zum **Verdrängen** (siehe (b) in Bild 6-2) von aktuell gefertigten Produkten kommen. Die Verfahren in diesen drei Bereichen schließen sich somit kategorisch aus. Im Bereich (d) sind Verfahren aufgezeigt, die mindestens zwei dieser Eigenschaften besitzen.

Infolge der in Bild 6-2 gezeigten Analyse kommen somit vier mögliche Schedulingverfahren in Betracht: EAT, FCFS, HRRN und SIRO. Aus physikalisch und logistischer Motivation ist es nicht möglich das zwei Produkte gleichzeitig an einem Ort, wie bspw. einer Warteschlange, ankommen. Somit würde das EAT-Verfahren dasselbe Ergebnis wie ein FCFS Scheduler liefern. Das SIRO Verfahren muss ausgeschlossen werden, da es sich hierbei um eine zufällige Zuweisung von Produkten zu Fertigungszellen bzw. Maschinen handelt. Im Bereich einer echtzeitfähigen Automatisierung von Fertigungsprozessen sind nicht-deterministische Vorgänge in der Regel nicht erwünscht, da sie nur schwer auf Basis von Wahrscheinlichkeiten planbar sind. Verbleibend ist der HRRN Scheduler, der basierend auf dem SPN¹⁶ Verfahren, jedoch ohne Verhungern von Aufträgen arbeitet. Der FCFS weist eine geringe Komplexität auf und ist ein sehr statisches Verfahren. Zudem sind Erweiterungen wie bspw. Produktprioritäten und Werkzeugwechseln nicht vorgesehen. Diese lassen sich allerdings aufgrund der **Änderungsfunktion** im HRRN Verfahren integrieren. Auf Basis dieser Analyse, sowie den Ergebnissen von LATIP et al. [LI11] und POLLMANN [Pol16] wird im Folgenden die Erweiterung des **HRRN** Verfahrens angestrebt.

¹⁶Der SPN Scheduler ist optimal hinsichtlich der mittleren Antwortzeit $\bar{\tau}_a$ [CMM67, S.27].

6.6 Entwicklung des erweiterten HRRN-basierten Planungsverfahrens

Für ein zellenbasiertes Fertigungsszenario, welches in Abschnitt 4.3 und in Bild 4-2 detailliert beschrieben wurde, ist es empfehlenswert aufgrund der Verfügbarkeit von Informationen und einer begrenzten Echtzeit-Kommunikationsbandbreite ein zweistufiges dynamisches Planungsverfahren zu verwenden [BPT16]. Hierbei wird zwischen der globalen Sicht auf die gesamte zellenbasierte Fertigung und in einer zellinternen Sichtweise mit unterschiedlichen Maschinen unterschieden [BPT16]. Gemäß der Definitionen zur Hierarchie von flexiblen Fertigungssystemen nach ELMARAGHY et al. in [EW09] (vgl. Abschnitt 2.1.1) befindet sich der globale Scheduler (GS) auf der Systemebene und der Zell-Scheduler (ZS) auf Zellen- bzw. Maschinenebene. Der GS hat eine globale Sicht auf die Eingangswarteschlange, das Bestellmanagement, die Generation der Produktintelligenz und die zellspezifischen Prozesszeiten. Der ZS plant die zellinternen Prozesse und interagiert mit den intelligenten Produkten sowie den Maschinen. Im Folgenden wird zunächst die Entwicklung des GS und im Anschluss des ZS erläutert.

6.6.1 Entwicklung des globalen Planungsverfahrens

Zentrale Aufgabe des globalen Schedulers ist es, die zu fertigenden Produkte auf die zur Herstellung benötigten Fertigungszellen zuzuweisen. Dies beinhaltet sowohl die dynamische Planung von neu generierten Produktaufträgen, als auch die Verwaltung und Koordinierung von bereits im verteilten Fertigungssystem befindlichen Produkten. Das Bild 6-3 zeigt die Definition von Zeitpunkten und Ereignissen, die essenziell für die Realisierung des globalen Schedulers sind. Die globale Wartezeit $\tau_q^{gs}(P_v)$ eines Produktes P_v ist definiert, als die Differenz zwischen den Zeitpunkten an dem das Produkt die globale Warteschlange verlässt $t_1^{gs}(P_v)$ und bei dem es in der globalen Warteschlange ankommt $t_0^{gs}(P_v)$. Nachdem Verlassen wird das Produkt innerhalb der Dauer $\tau_t^{gs}(P_v)$ transportiert, bis es zum Zeitpunkt $t_2^{gs}(P_v)$ bei der Fertigungszelle Σ_N bzw. deren Warteschlange ankommt. Im eigentlichen Scheduling des Fertigungssystems wird die Transportzeit nicht berücksichtigt.

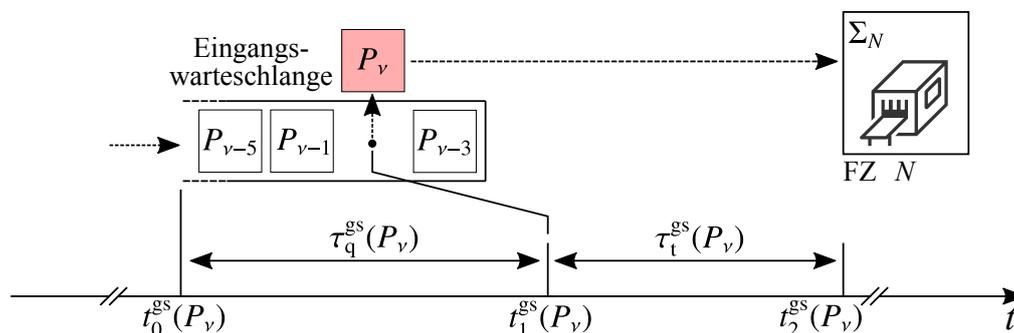


Bild 6-3: Definition von Zeitpunkten und Ereignissen beim globalen Scheduler

Basierend auf diesen dynamischen und produktspezifischen Größen, wird im Folgenden die Arbeitsweise des GS erläutert. Die Gleichung (6-5) berechnet die gesamte produktspezifische Bearbeitungszeit $\tau_\Sigma(P_v)$ für alle vom Produkt benötigten Maschinen $j \leq J$ und

erforderlichen Fertigungszellen $n \leq N$.

$$\tau_{\Sigma}^{\text{gs}}(P_{\nu}) = \sum_{\substack{n \leq N \\ j \leq J}} \tau_{\Sigma n, j}(P_{\nu}) \quad (6-5)$$

Der globale produktspezifische Antwortquotient $\Gamma_{\text{gs}}(P_{\nu})$ des erweiterten HRRN (engl. extended HRRN, **extHRRN**) Algorithmus, ist in Gleichung (6-6) dargestellt. Der Unterschied zum klassischen HRRN Algorithmus welcher beispielsweise von LATIP et. al [LI11] oder STALLINGS in [Sta03] gezeigt wurde, ist die multiplikative Erweiterung der variablen Produktpriorität $\rho(P_{\nu})$ [BPT16]. Hierdurch ist es möglich, ein oder mehrere Produkte vor oder während des Fertigungsprozesses zu bevorzugen.

$$\Gamma_{\text{gs}}(P_{\nu}) = \rho(P_{\nu}) \frac{\tau_{\Sigma}^{\text{gs}}(P_{\nu}) + \tau_{\text{q}}^{\text{gs}}(P_{\nu})}{\tau_{\Sigma}^{\text{gs}}(P_{\nu})} \quad (6-6)$$

Nachdem ein Produkt einer Zelle zugeordnet wurde, meldet es sich nach der erfolgreich beendeten zellinternen Bearbeitung beim GS an. Hierdurch kann die Zuordnung auf nachfolgende Bearbeitungsschritte bzw. FZs erfolgen. Der Pseudoalgorithmus 1 beschreibt die prinzipielle zyklische Abarbeitung des extHRRN Schedulers für ein produkttolerantes und vernetztes Fertigungssystem.

Algorithmus 1 :Pseudoalgorithmus des extHRRN Scheduling-Verfahrens

Require: P_{ν} Produktbedürfnisse

```

1: function EXT_HRRN( $P_{\nu}$ )
2:   if eine oder mehrere FZs frei then
3:     for jedes Produkt  $P_{\nu}$  ( $\nu \in \mathbb{N}$ ) in der globalen Warteschlange do
4:       Berechne  $\tau_{\Sigma}^{\text{gs}}(P_{\nu})$  und  $\Gamma_{\text{gs}}(P_{\nu})$ 
5:       Sortiere Produkte in der globalen Warteschlange nach absteigendem  $\Gamma_{\text{gs}}$ 
6:       Zuweisung der Produkte auf benötigte FZs
7:     end for
8:   end if
9: end function

```

Zur Berücksichtigung der Werkzeugwechsel sowie deren Reduzierung wird im Folgenden die Entwicklung des zellinternen Schedulers gezeigt.

6.6.2 Entwicklung des zellinternen Planungsverfahrens

Das Bild 6-4 zeigt die Definition von Ereignissen für den zelleninternen erweiterten HRRN (engl. retool HRRN, **rtHRRN**) mit zusätzlicher Berücksichtigung der Werkzeugwechselzeiten. Die Wartezeit innerhalb der zellinternen Warteschlange $\tau_{\text{q}}^{\text{zs}}$ ist als die Differenz aus Ankunftszeit im jeweiligen Maschinenpufferspeicher t_1^{zs} und dem Ankunftszeitpunkt in der Zellenwarteschlange t_0^{zs} definiert. Die nachfolgende Verzögerung bis zum Beginn des zellinternen Prozesses bzw. der Maschinentätigkeit t_2^{zs} setzt sich aus der Wartezeit im Maschinenpufferspeicher $\tau_{\text{ep}}^{\text{zs}}(P_{\nu}, \Sigma_{n, j})$ und einer produktspezifischen Rekonfigurations-

bzw. Umrüstzeit $\tau_{rt}^{zs}(P_v, \Sigma_{n,j})$ zusammen. Eine Berücksichtigung der Wartezeit im Maschinenpufferspeicher innerhalb der dynamischen Planung ist nicht zielführend, weil bereits eine eindeutige Maschinenzuweisung erfolgt ist¹⁷. Die Wartezeit im Maschinenausgangspuffer $\tau_{ap}^{zs}(P_v, \Sigma_{n,j})$ ist definiert als Differenz der Zeitpunkte t_4^{zs} und t_3^{zs} . Die wertschöpfende Tätigkeit wird durch die maschinen- und produktspezifische Dauer $\tau_{\Sigma_{n,j}}$, welche mit dem Zeitpunkt t_3^{zs} endet, beschrieben.

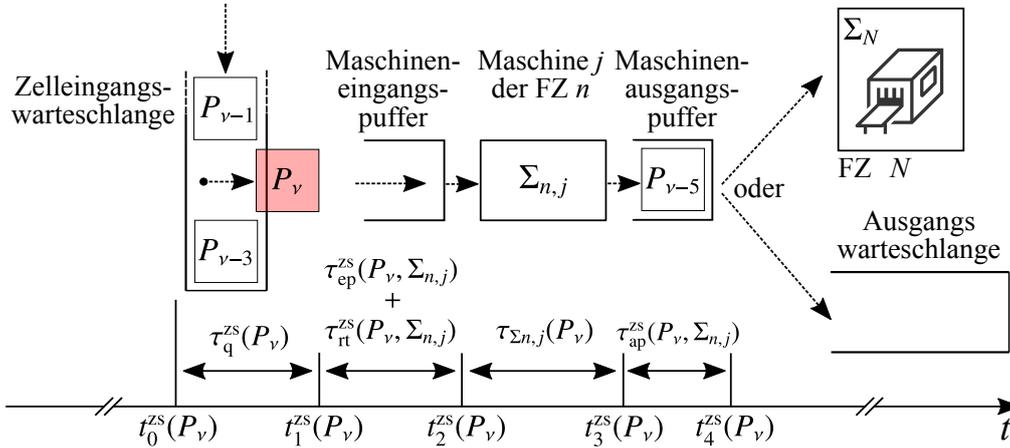


Bild 6-4: Definition von Zeitpunkten und Ereignissen beim zellinternen Scheduler

Zum Zeitpunkt t_4^{zs} verlässt das teilgefertigte oder fertiggestellte Produkt die FZ und wird über den GS einer nachfolgende Fertigungszelle zugewiesen oder zur Ausgangswarteschlange transportiert. Ergänzend zum extHRRN (siehe Gleichung (6-6)) ist die Berechnung des Antwortquotienten $\Gamma_{zs}(P_v, \Sigma_{n,j})$ des zellinternen rtHRRN in Gleichung (6-7) veranschaulicht. In diesem Fall sind zusätzlich eine produktspezifische Umrüstzeit $\tau_{rt}^{zs}(P_v, \Sigma_{n,j})$ und die bereits beim GS hinzugefügte Produktpriorität $\rho(P_v)$ ergänzt worden [BPT16]. Durch diese Erweiterung ist es möglich hohe Umrüstkosten- bzw. -zeiten zu bestrafen und Produkte mit geringem Rekonfigurationsaufwand zu bevorzugen.

$$\Gamma_{zs}(P_v, \Sigma_{n,j}) = \rho(P_v) \frac{\tau_{\Sigma_{n,j}}(P_v) + \tau_q^{zs}(P_v, \Sigma_{n,j})}{\tau_{\Sigma_{n,j}}(P_v) + \tau_{rt}^{zs}(P_v, \Sigma_{n,j})} \quad (6-7)$$

Für das eigentliche dynamische Scheduling innerhalb der FZ wird die Gleichung (6-7) zyklisch in einer Funktion berechnet. Der Pseudoalgorithmus 2 veranschaulicht, die zyklische Berechnung der Kenngrößen und des Antwortquotienten sowie dessen Sortierung.

Neben dem eigentlichen dynamischen Auswahlverfahren welches, bspw. durch den neu entwickelten extHRRN/rtHRRN Scheduler realisiert wird, ist für die vollständige Integration und Validierung eine zusätzliche Softwareumgebung erforderlich. Innerhalb dieser Umgebung müssen zum Beispiel Produkte mit ihren Bedürfnissen erzeugt und in dynamischen Listen verwaltet werden. Zudem ist es erforderlich die Topologie des zellenbasierten flexiblen Fertigungssystems und dessen unterschiedliche Fähigkeiten definiert abzubilden.

¹⁷Für eine Analyse der Antwortzeit $\tau_a(P_v)$ bzw. der mittleren Antwortzeit $\bar{\tau}_a$ muss die Wartezeit innerhalb eines Maschinenpufferspeichers wieder berücksichtigt werden.

Algorithmus 2 Pseudoalgorithmus des rtHRRN Scheduling-Verfahrens

Require: P_v Produktbedürfnisse und dynamische Maschinenvergangenheit $\Sigma_{n,j}$

```

1: function rtHRRN( $P_v, \Sigma_{n,j}$ )
2:   if eine oder mehrere Maschinen  $j$  der FZ  $n$  frei then
3:     for jedes Produkt  $P_v$  ( $v \in \mathbb{N}$ ) in der Zellwarteschlange do
4:       Berechne  $\Gamma_{zs}(P_v, \Sigma_{n,j})$ 
5:       Sortiere Produkte in der Zellwarteschlange nach absteigendem  $\Gamma_{zs}$ 
6:       Zuweisung der Produkte auf Maschine  $j$  der FZ  $n$ 
7:     end for
8:   end if
9: end function

```

6.7 Simulationsumgebung unter MATLAB

Zur Untersuchung und Validierung der in Abschnitt 6.6 entwickelten extHRRN bzw. rtHRRN Schedulers wurde unter MATLAB[®] objektorientiert eine Simulationsumgebung entwickelt¹⁸. Die Umgebung ist in der Lage beliebige zellenbasierte und produktgesteuerte Fertigungsszenarien, gemäß der im Abschnitt 4.3 erläuterten Topologie (vgl. Bild 4-2), abzubilden. Grundgedanke ist stets, das Produkte mit einer zuvor definierten Varianz an **Produktbedürfnissen** (siehe Definition 2) und variablen Losgrößen durch ein zellenbasiertes Fertigungssystem produziert werden. Dieses besteht aus Fertigungszellen, deren Maschinen über eine zuvor definierte Varianz an Fähigkeiten die **Produkttoleranz** (siehe Definition 3) gewährleisten. Grundidee bei der Entwicklung und Programmierung der Simulationsumgebung unter MATLAB[®] war, dem Benutzer (siehe ① in Bild 6-5) möglichst viel Flexibilität hinsichtlich der Konfiguration des zu untersuchenden Fertigungsszenario zu ermöglichen. Über eine Konfigurationsdatei (siehe ④ in Bild 6-5) können beispielsweise folgende Einstellungsmöglichkeiten des zellenbasierten Fertigungssystems vorgenommen werden:

- Beschreibung der Anordnung von FZs im Fertigungssystem sowie die Berücksichtigung der logistischen und logischen Zusammenhänge.
- Anordnung und Fähigkeiten der zelleninternen Maschinen.
- Größe der globalen und zelleninternen Warteschlangen.
- Produktbedürfnisse, d.h. welche Produktvielfalt bzw. -varianz liegt vor.

Für die Erläuterung der objektorientierten Softwarearchitektur wird im Folgenden das Klassendiagramm der Simulationsumgebung, welches im Bild 6-5 ⑤ dargestellt ist, erklärt. Die abstrakte Klasse **Management** ist im Wesentlichen für die Warteschlangen¹⁹ und Verteilung der Produkte auf FZs und Maschinen zuständig.

Durch die abstrakte Klasse **Arbeiter** wird ein vereinfachter Zugriff auf die Parameter der Maschinen und Fertigungszellen ermöglicht. Diese Klasse ist nicht zwingend erforderlich,

¹⁸Der erste Prototyp der Simulationsumgebung entstand durch die Bachelorarbeit von Herrn Jan Frederik Pollmann [Pol16] und wurde im Anschluss stetig weiter entwickelt.

¹⁹Die Warteschlangen wurden über die JavaTM Klasse ArrayList unter Matlab implementiert und können in der maximalen Größe beliebig parametrisiert werden.

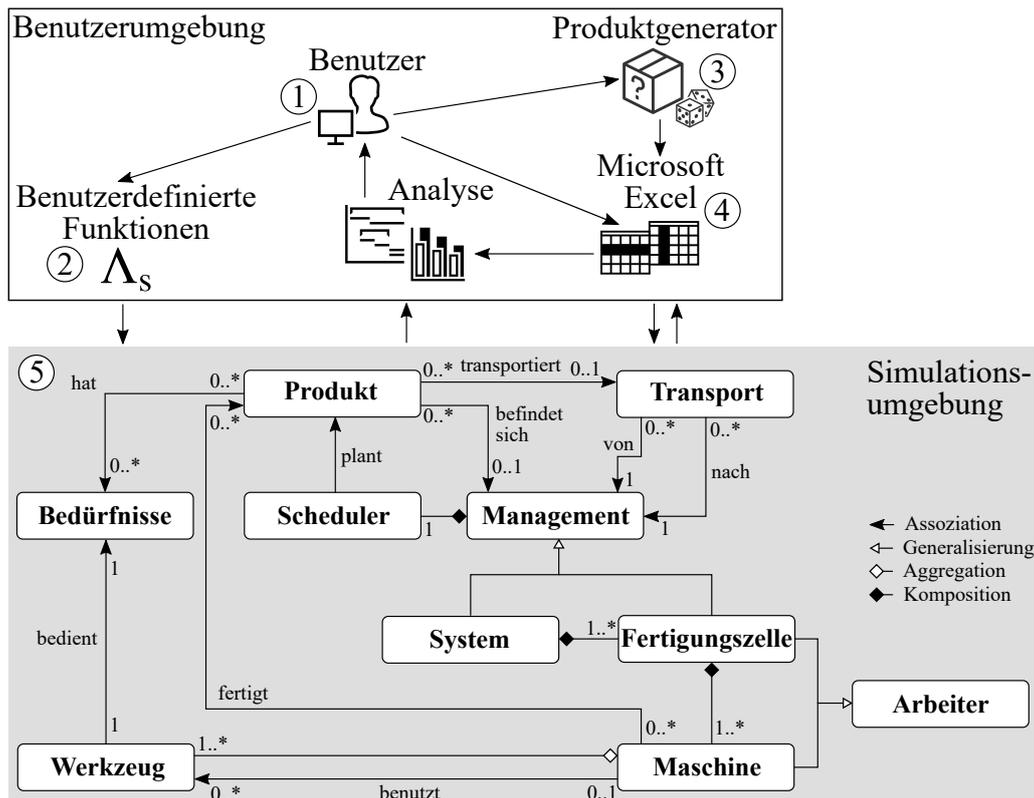


Bild 6-5: Klassendiagramm der Simulationsumgebung zur Untersuchung des dynamischen Scheduling von flexiblen zellenbasierten Fertigungssystemen

ermöglicht allerdings eine schnelle Umsetzung für eventuelle spätere Erweiterung des Schedulingkonzeptes. Mittels der Klasse **Werkzeug** werden die Fähigkeiten einer Maschine definiert, welche aus den Produktbedürfnissen resultieren. Fundamental für die Funktion der Simulationsumgebung sind die vier Klassen: **System**, **Fertigungszelle**, **Maschine** und **Produkt**²⁰. Über die Klasse **System** wird im Wesentlichen die Systemebene aus der Definition nach ELMARAGHY et al. [EW09] in der Hierarchie von flexiblen Fertigungssystemen abgebildet. Innerhalb dieser Klasse wird die globale Warteschlange und die Koordination bzw. Verteilung der Produkte auf die FZs gesteuert.

Jede Klasse **Fertigungszelle** (vgl. Ebene 2 in Bild 2-1) verfügt infolge der Vererbung des **Managements** über eine lokale Warteschlange, einen Scheduler und mindestens eine Maschine. Die Klasse **Maschine** (vgl. Ebene 1) stellt neben einem Ein- und Ausgangspuffer eine Reihe von Fähigkeiten zur Verfügung, die aus der Klasse **Werkzeug** resultieren. Diese werden benötigt, um die Klasse **Bedürfnisse**, welche mit der Klasse **Produkt** verknüpft ist, zu bedienen. Die Maschine wird im Wesentlichen durch einen Zustandsautomaten mit den Zuständen: Wartend, Blockiert, Arbeitend und Werkzeugwechsel sowie den entsprechenden Übergangstransitionen beschrieben [Pol16]. In der Klasse **Scheduler** erfolgt die eigentliche dynamische Fertigungsplanung. Die Auswahlfunktion des Schedulers Λ_s (siehe Tabelle 6-1) ist über die benutzerdefinierten Funktionen ②, welche ebenfalls unter Matlab implementiert sind, frei wähl- und parametrierbar. Mit der Klasse **Transport** werden die Produkte über zuvor fest definierte Transportzeiten innerhalb der Fertigungstopologie

²⁰Motiviert durch die Definitionen zur Hierarchie von flexiblen Fertigungssystemen nach ELMARAGHY et al. in [EW09] (vgl. Abschnitt 2.1.1).

zwischen den FZs bewegt.

Mittels eines **Produktgenerators** ③, welcher ein weiteres Bestandteil der Benutzerumgebung darstellt, können zufällige Fertigungsaufträge generiert werden. Nach der Generation werden alle erforderlichen Auftragsdaten innerhalb der Microsoft Excel Konfigurationstabelle gespeichert und dienen als Eingangsgröße für die Simulation. Zufällig bedeutet im Rahmen dieser Arbeit, dass eine Gleichverteilung²¹ der Auftragsvarianzen vorliegt, welche durch die in MATLAB[®] zur Verfügung gestellte Funktion rand() realisiert wurde. Die Auftragsvarianz bedeutet, dass die Produktvariante, die Losgröße des Auftrages, der Ankunftszeitpunkt in der Fertigung und die Produktpriorität zufällig erzeugt werden können. Hierdurch ist es möglich, eine unabhängige Untersuchung unterschiedlichster Scheduling-Verfahren durchzuführen.

6.8 Funktionsanalyse des erweiterten HRRN Verfahren

Zur Analyse der Funktionsweise des in Abschnitt 6.6 vorgestellten extHRRN und rtHRRN Schedulers wurde zunächst ein einfaches zellenbasiertes Fertigungsszenario gewählt. Dieses besteht aus drei sequenziell angeordneten Fertigungszellen (Σ_1 , Σ_2 und Σ_3) mit jeweils zwei parallel arbeiteten Maschinen ($\Sigma_{1,1}$, $\Sigma_{1,2}$, $\Sigma_{2,1}$, $\Sigma_{2,2}$, $\Sigma_{3,1}$ und $\Sigma_{3,2}$). Jedes zu fertigende Produkt P_v mit sechs möglichen Varianten (A,B,C,D,E und F) muss für den gesamten Fertigungsprozess alle drei FZs durchlaufen. In den Zellen Σ_1 und Σ_3 finden wertschöpfende Tätigkeiten am Produkt P_v statt, die nicht variantenspezifisch sind, d.h. alle sechs Produktvarianten müssen durch eine der Maschine in FZ 1 ($\Sigma_{1,1}$ oder $\Sigma_{1,2}$) bzw. in FZ 3 ($\Sigma_{3,1}$ oder $\Sigma_{3,2}$) bearbeitet werden. Die Besonderheit der zweiten flexiblen Fertigungszelle Σ_2 besteht darin, dass die eine Maschine $\Sigma_{2,1}$ nur Produkte, der Variante A,B,C und E fertigen kann. Die zweite Maschine $\Sigma_{2,2}$ kann nur die Fertigungsoperationen an den Produktvarianten A,B,D und F durchführen. FZ 2 übt einen wesentlich komplexer Fertigungsschritt aus, als die FZ 1 oder FZ 3. Infolge einer Rekonfigurationsfähigkeit durch Werkzeugwechsel, ist es ihr trotzdem möglich unterschiedliche Produktvarianten zu fertigen. Die Tabelle 6-2 zeigt die Transportzeit τ_t zwischen den einzelnen Fertigungszellen Σ_n , die Maschinenbearbeitungszeiten $\tau_{\Sigma n, j}$, die Werkzeugwechselzeiten τ_{rt} für das beschriebene Szenario und die Anzahl der Warteschlangenplätze $W_{\Sigma n}$ innerhalb einer FZ. Die globale Warteschlange hat eine Größe von $W_G = 25$ Plätzen.

Tabelle 6-2: Transport-, Maschinenbearbeitungs- und Werkzeugwechselzeiten

τ_t	Σ_1	Σ_2	Σ_3	$\tau_{\Sigma n, 1}$	$\tau_{\Sigma n, 2}$	τ_{rt}	$W_{\Sigma n}$
Σ_1	0 s	2 s	3 s	2 s	2 s	/	2
Σ_2	2 s	0 s	3 s	A: 6 s B: 7 s C: 8 s E: 9 s	A: 6 s B: 7 s D: 8 s F: 9 s	1 s	3
Σ_3	2 s	3 s	0 s	5 s	5 s	/	2

²¹Die Gleichverteilung kann ohne viel Aufwand gegen eine andere Verteilungsart bspw. eine Normalverteilung getauscht werden.

Für eine erste Funktionsanalyse wurde die in Tabelle 6-3 dargestellte Produktsequenz verwendet. Hierbei wurden die Varianten der 20 Produkte zufällig gewählt (siehe Abschnitt 6.7) und nur die Prioritäten der Produkte P_3 und P_{20} erhöht, damit die Bevorzugung einzelner Produkte untersucht werden kann. Das Produkt P_3 mit Variante A wurde aufgrund seiner geringen Bearbeitungszeit in der FZ 2 gewählt. Aus Sicht eines Scheduling-Verfahrens ist die Höherpriorisierung des Produkt P_{20} kontraproduktiv, weil es an letzter Stelle der Sequenz ist und zudem die höchste variantenabhängige Bearbeitungszeit in Σ_2 aufweist.

Tabelle 6-3: Produktsequenz mit unterschiedlichen Varianten und Prioritäten

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}
Var.	D	E	A	B	C	A	E	D	C	F	A	A	F	D	B	D	A	B	A	E
$\rho(P_v)$	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4

Analog zur Vorgehensweise von LATIP et al. in [LI11] wird für die Funktionsanalyse des neu entwickelten extHRRN / rtHRRN Schedulingverfahrens ein simulationsbasierter Vergleich mit einem globalen, sowie zellinternen FCFS Scheduler durchgeführt und dessen Ergebnisse im Folgenden diskutiert.

Das Bild 6-6 zeigt die produktspezifischen Antwortzeiten $\tau_a(P_v)$ zur Fertigung der Produktsequenz für den FCFS und den extHRRN / rtHRRN Scheduler.

Die Antwortzeit setzt sich aus der Summe aller Transport-, Warte-, Werkzeugwechsel und Bearbeitungszeiten zusammen, die das Produkt während der Fertigung erfährt. Dies entspricht der in Gleichung (6-1) definierten Zeitdifferenz. Die Wartezeit berücksichtigt in diesem Fall die lokale und globale Warteschlange sowie die Wartezeit eines Produktes in einer blockierten Maschine.

Im Bild 6-6 a) ist der für den FCFS Scheduler typische lineare Anstieg der Antwortzeiten mit steigender Produktnummer zu beobachten. Ebenfalls ist ersichtlich, dass keine Berücksichtigung der höheren Produktprioritäten von P_3 und P_{20} bzw. unterschiedlichen Bearbeitungszeiten der FZ 2 erfolgt, da der FCFS dies nicht berücksichtigen kann.

Im Gegensatz dazu zeigen die Antwortzeiten mit dem extHRRN / rtHRRN in Bild 6-6 b) eine deutliche Veränderung in der Abarbeitung. Hierbei weisen die Produkte P_3 und P_{20} gemäß ihrer höheren Priorität die geringste Antwortzeit auf. Nachfolgend werden die Produkte mit steigender variantenabhängiger Bearbeitungszeit ausgewählt, d.h. Variante A ($P_6, P_{11}, P_{12}, P_{17}$ und P_{19}), Variante B (P_4, P_{15} und P_{18}), Variante C/D ($P_1, P_5, P_8, P_9, P_{14}$ und P_{16}), Variante E/F (P_2, P_7, P_{10} und P_{13}). Für diese Produktsequenz hat der FCFS gemäß der Gleichung (6-2) eine mittlere Antwortzeit von 62,05 s. Im Falle des extHRRN / rtHRRN Verfahrens ergibt sich eine mittlere Antwortzeit von 56,7 s. Dies entspricht nach Gleichung (6-4) einer Beschleunigung der Abarbeitung von 8,62 %.

Aus Sicht des gesamten Fertigungssystems ergeben sich durch den extHRRN / rtHRRN Ansatz im Vergleich zum FCFS Scheduler veränderte Arbeitsabläufe, die für das Produkt P_3 und P_{20} in Bild 6-7 im Detail dargestellt sind.

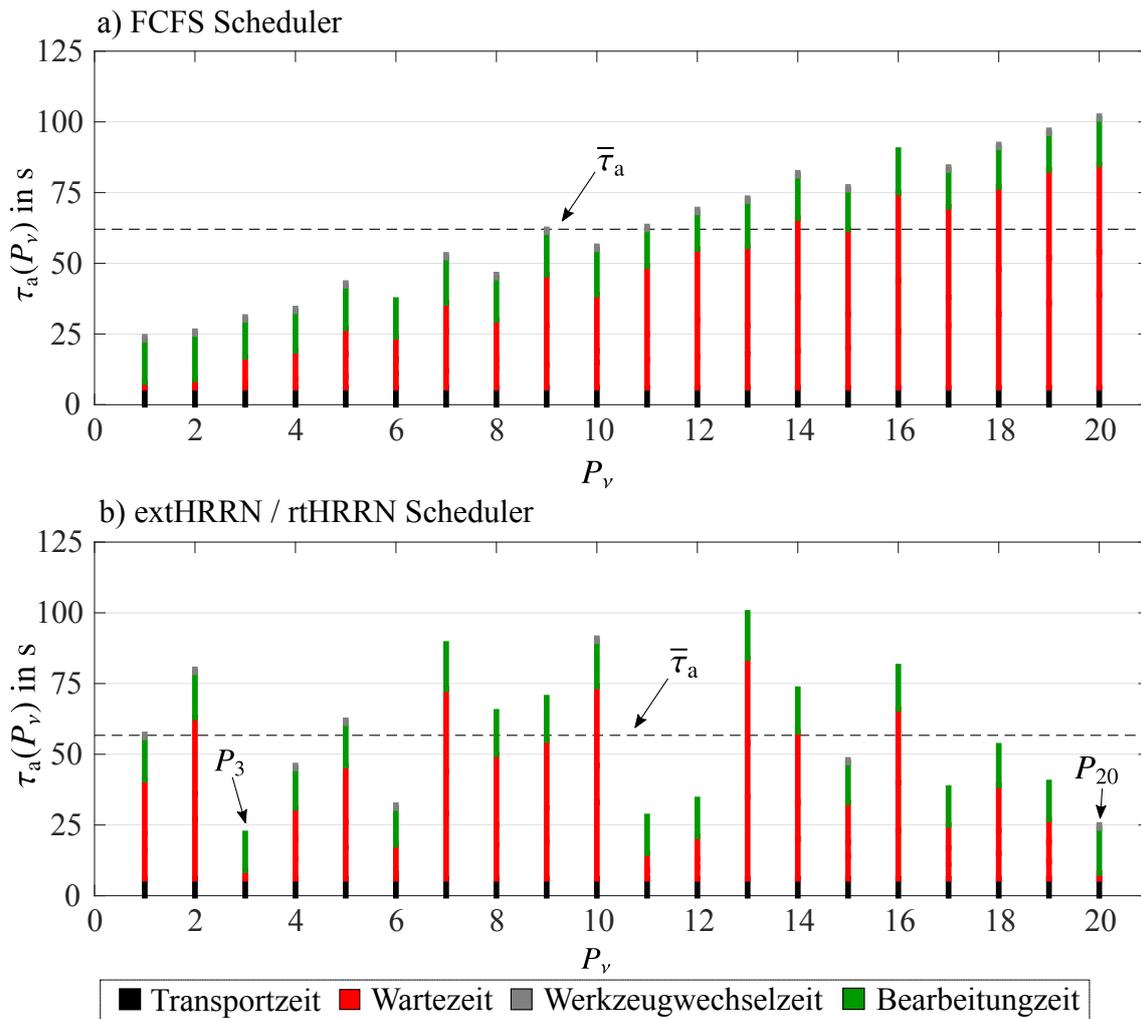
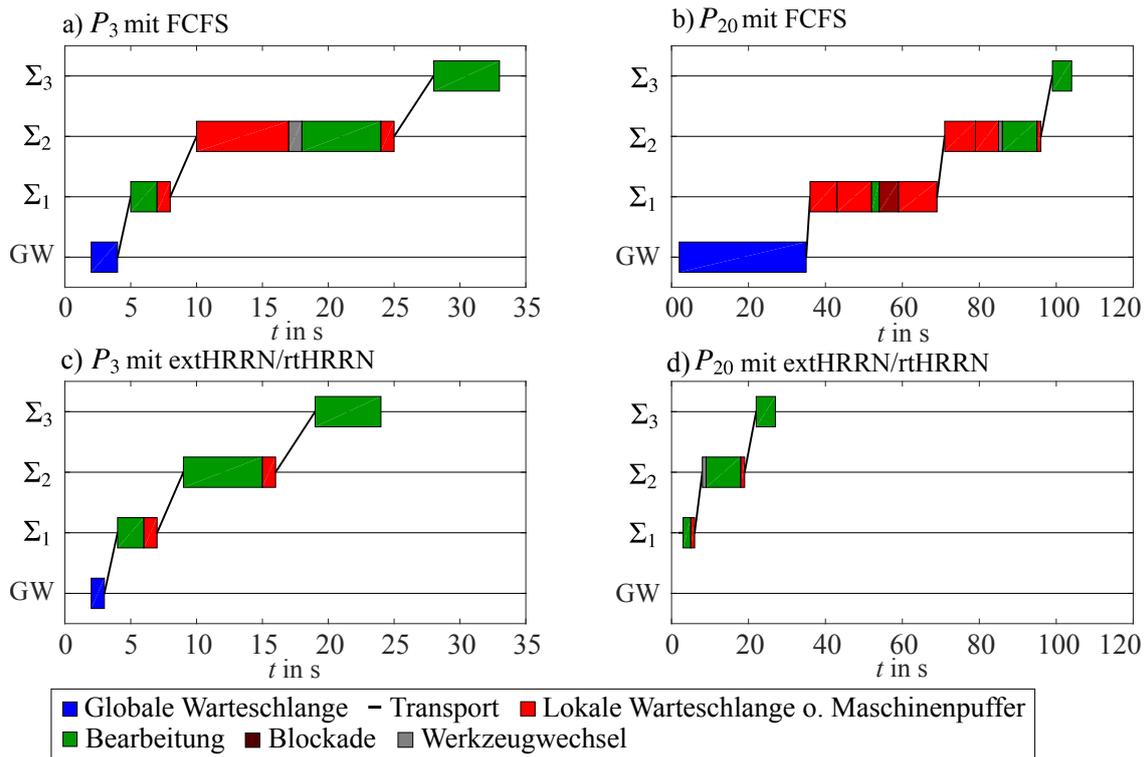


Bild 6-6: Antwortzeiten $\tau_a(P_v)$ für den FCFS und extHRRN / rtHRRN Scheduler

In den Bildern 6-7 a) und c) ist der Fertigungsablauf des Produktes P_3 für FCFS sowie extHRRN / rtHRRN in Abhängigkeit der Ressourcen globale Warteschlange (GW) und der Fertigungszellen Σ_1 bis Σ_3 dargestellt. Für den FCFS Scheduler beträgt die Antwortzeit des Produktes $\tau_a(P_3) = 31$ s und im Falle des extHRRN / rtHRRN $\tau_a(P_3) = 22$ s. Die neun Sekunden Differenz infolge der wirksamen Höherpriorisierung lassen sich auf eine höhere Wartezeit in der GW und in der FZ 2 durch die Umsortierung der Produktabarbeitungsreihenfolge zurückführen.

Infolge der höchsten Priorisierung $\rho(P_{20}) = 4$ (vgl. Tabelle 6-3) ist beim Produkt P_{20} die größte Änderung in der Abarbeitung zu beobachten, welche in den Bildern 6-7 b) und d) dargestellt ist. Die Antwortzeit für den FCFS beträgt $\tau_a(P_{20}) = 102$ s, während sie für den extHRRN / rtHRRN mit $\tau_a(P_{20}) = 25$ s nahezu um den Faktor 4 geringer ist. Dies ist ebenfalls auf die Höherpriorisierung zurückzuführen, welche die Wartezeiten in der GW, FZ 1 und FZ 2 nahezu eliminiert. Diese Analyse zeigt detailliert an welchen Stellen die bereits in Bild 6-6 gezeigte Reduzierung der Antwortzeiten durchgeführt wurde und dass die Kombination aus extHRRN / rtHRRN in der Lage ist, einzelne Produkte oder Fertigungslose zu bevorzugen.

Bild 6-7: Fertigungsablauf der Produkte P_3 und P_{20}

Neben der produktindividuellen Priorisierung, welche bereits in Gleichung (6-6) im Abschnitt 6.6 dargestellt ist, wurde für den zellinternen rtHRRN Scheduler in Gleichung 6-7 zusätzlich die Werkzeugwechselzeit τ_{rt} als Bestrafungsterm eingeführt (siehe Abschnitt 6.6.2). Zur Untersuchung der Auswirkung dieser Ergänzung wird im Folgenden die FZ 2 näher betrachtet, da ihre Maschinen $\Sigma_{2,1}$ und $\Sigma_{2,2}$ als einzige über Werkzeugwechselfähigkeiten verfügen um die sechs Produktvarianten fertigen zu können.

Das Bild 6-8 zeigt die Bearbeitung der 20 Produkte auf den zwei Maschinen $\Sigma_{2,1}$ und $\Sigma_{2,2}$ der Fertigungszelle 2. Der FCFS Scheduler im Bild 6-8 a) zeigt analog zum Bild 6-6 die sequenzielle Abarbeitung der 20 Produkte gemäß ihrer Reihenfolge in Tabelle 6-3. Bei der Abarbeitung müssen stets die in Tabelle 6-2 beschriebenen, unterschiedlichen Fähigkeiten der Fertigungszellen (Σ_1 , Σ_2 und Σ_3) berücksichtigt werden. Im Falle des extHRRN / rtHRRN Verfahrens im Bild 6-8 b) ist im Vergleich zum FCFS eine deutliche Änderung in der Abarbeitung zu erkennen. Wiederum wird zuerst das Produkt P_{20} auf die Maschine 1 zugewiesen, welche für die Fertigung der Variante E erforderlich ist. Nahezu zeitgleich beginnt die Maschine 2 mit der Bearbeitung des Produktes P_3 mit der nächst höheren individuellen Priorität. Im Anschluss werden die Produkte mit steigenden Bearbeitungszeit und hinsichtlich einer möglichst geringen Anzahl an Werkzeugwechseln zu den beiden Maschinen zugeordnet. Der FCFS Scheduler benötigt für die Bearbeitung der 20 Produkte innerhalb der FZ 2 $N_{RT} = 18$ Werkzeugwechseloperationen, wohingegen das extHRRN / rtHRRN Verfahren nur $N_{RT} = 8$ Änderungen der Werkzeuge benötigt. Dies entspricht einer prozentualen Verringerung der Werkzeugwechsel von etwa 56 %.

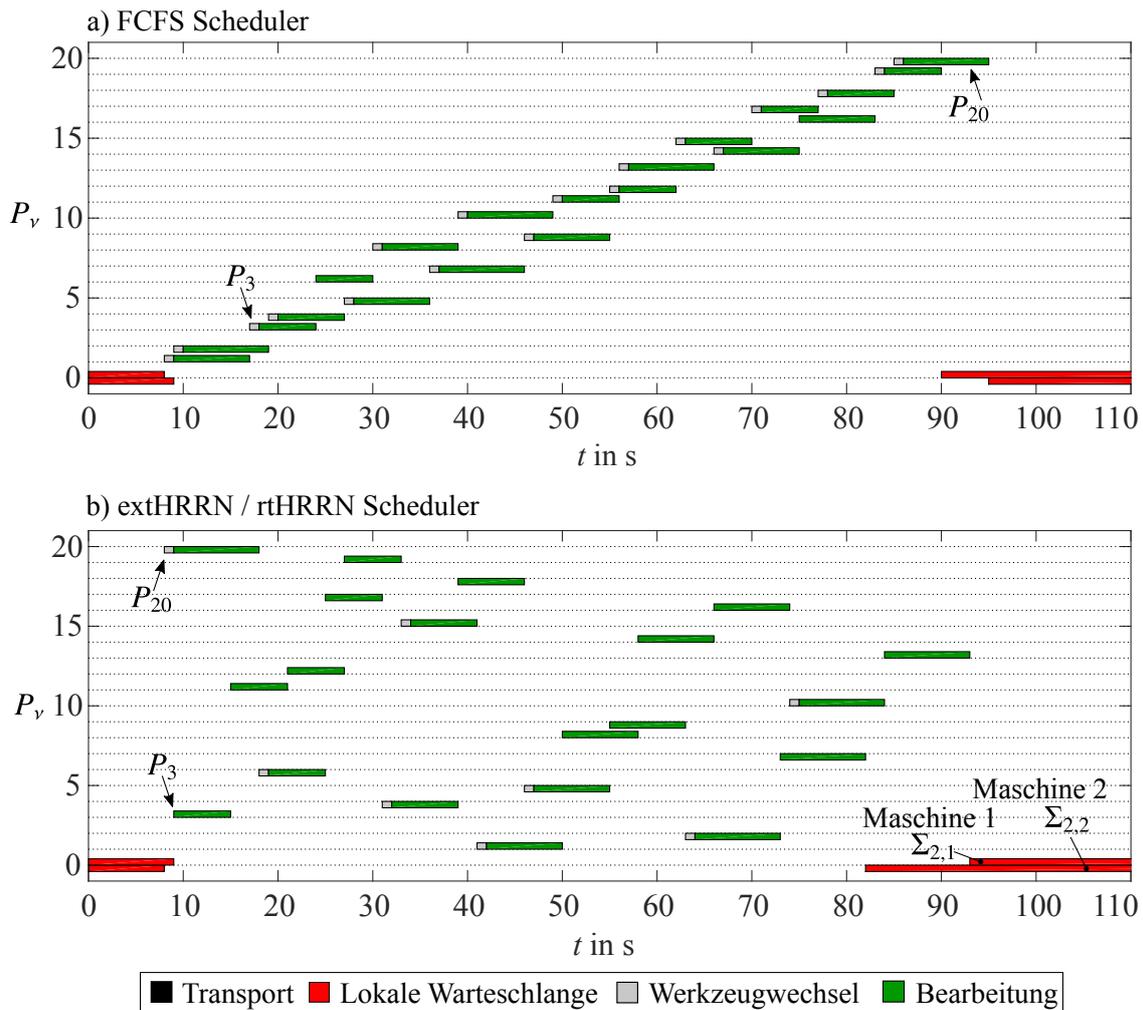


Bild 6-8: Arbeitsablauf der FZ Σ_2 für a) den FCFS und b) extHRRN / rtHRRN Scheduler.

6.9 Fazit und Zusammenfassung

Zu Beginn des Kapitels wurden Grundlagen zum Verständnis und zur Bewertung von Konzepten zur dynamischen Ablaufplanung erläutert. Anschließend wurden 18 unterschiedliche Konzepte vorgestellt und mit dem Stand der Wissenschaft und Technik diskutiert. Auf Basis von definierten Anforderungen konnte der HRRN Scheduler als Grundlage für eine produkttolerante Planung eines zellenbasierten Fertigungssystems identifiziert werden. Dieser wurde für die globale Planung um eine produktindividuelle Priorität und für die zellinterne Planung zusätzlich um die Werkzeugwechselzeit erweitert. Für detaillierte Untersuchungen wurde unter MATLAB eine objektorientierte Simulationsumgebung für zellenbasierte Fertigungssysteme entwickelt. In einer abschließenden simulativen Funktionsanalyse zeigt das extHRRN / rtHRRN Verfahren gegenüber dem FCFS Scheduler eine Reduzierung der mittleren Antwortzeit und der Werkzeugwechsel für die **eine** in Tabelle 6-3 gezeigte **Produktsequenz**. Zudem konnte gezeigt werden, dass produktindividuelle Prioritäten berücksichtigt werden können. Für eine belastbare Aussage hinsichtlich der Performanz des neu entwickelten Schedulingverfahrens werden in Kapitel 8 die Ergebnisse einer Simulationsstudie diskutiert, die an einem weitaus komplexeren Anwendungsszenario einer produkttoleranten Kerzenfertigung durchgeführt wurden.

7 Produkttolerante Kerzenfertigung

Derzeit wird am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in Paderborn ein Forschungsdemonstrator aufgebaut, der es ermöglicht, kundenspezifische Glaskerzen in geringen Stückzahlen bis hin zur Ein-Stück-Fertigung herzustellen. Die Tabelle 7-1 zeigt die Variantenvielfalt der zu fertigenden Glaskerzen, welche durch die produkttolerante Kerzenfertigung zu bewältigen ist. Im ersten Schritt wurde ein erster Prototyp realisiert, der es ermöglicht, Glaskerzen mit der **Produktvarianz** $\Delta P_v^A = 8$ herzustellen. Dies bedeutet, dass Kerzen in **acht** unterschiedlichen **Varianten**, d.h. in **vier Farben** (weiß, rot, grün und gelb) und in **zwei** unterschiedlichen **Größen**²² gefertigt werden können. Hinzu kommt die Fertigungsoption, eine Kerze mit einem kundenspezifischen Etikett bspw. einem DataMatrix-Code zu versehen. Somit wird jede Kerze zu einem Unikat. In einer zweiten zukünftigen Ausbaustufe soll zusätzlich zur Produktvarianz ΔP_v^A ebenso die **Produktvarianz** ΔP_v^B gefertigt werden. Hierbei sollen optional Glaskerzen mit zwei unterschiedlichen Farbschichten produziert werden (siehe Tabelle 7-1). Dies bedeutet, dass neben den acht Grundvarianten weitere 24 Kombination möglicher Glaskerzen hinzu kommen. Diese setzen sich zusammen aus den 12 neuen Farbvarianten in zwei unterschiedlichen Größen. Insgesamt ergibt dies 32 unterschiedliche Varianten von Glaskerzen, die durch individuelle Kundenetiketten mit einer Losgröße von eins gefertigt werden müssen (entspricht den Anforderungen $A_{PT1,2}$ bzw. Entwurfsschritt 1.1, vgl. Abschnitt 5.3). Die Nummerierung ist für das Verständnis der Simulationsergebnisse im Kapitel 8 erforderlich. Ein tiefgestellte Zahl entspricht hierbei einer kleinen Glaskerze, wohingegen eine hochgestellte Zahl eine Große darstellt.

Tabelle 7-1: Produktvarianz der Glaskerzen mit den Bedürfnissen P_v

	Klein	Groß	Etikett	Weiß	Rot	Grün	Gelb
Weiß	 1	 5		 17 1	 18 2	 19 3	 20 4
Rot	 2	 6		 21 5	 22 6	 23 7	 24 8
Grün	 3	 7		 25 9	 26 10	 27 11	 28 12
Gelb	 4	 8		 29 13	 30 14	 31 15	 32 16
	Produktvarianz ΔP_v^A			Produktvarianz ΔP_v^B			

Im Folgenden wird die Konzeptionierung, der Prozessablauf und die erforderliche Topologie des zur Glaskerzenherstellung benötigten produkttoleranten und zellenbasierten Fertigungssystems detailliert erläutert. Grundlegend hierfür sind alle vorherig diskutierten Sachverhalte insbesondere die Kapitel 2 und 3 sowie der Abschnitt 4.4.2.

²²Das kleine Kerzenglas hat eine Kegelstumpf-Form mit den Abmessungen $48 \times 52 \times 63$ mm. Beim großen Kerzenglas betragen die Abmessungen $77 \times 72 \times 65$ mm

7.1 Konzept und Aufbau des zellenbasierten produkttoleranten Kerzenfertigungsprozesses

Hauptfokus bei der Konzeptionierung und Entwicklung des zellenbasierten produkttoleranten Kerzenfertigungsprozesses ist die modulare Funktionsbauweise, d.h. flexible FZs mit einer definierten Funktionsbandbreite deren Verwendung prinzipiell für unterschiedliche Fertigungs- und Systemtopologien möglich ist. Hierbei handelt es sich um eine komplette Neuentwicklung des Fertigungssystems, somit wird die zu fertigende Produktvarianz ΔP_v , die in Tabelle 7-1 dargestellt ist, von Beginn an berücksichtigt. Hierfür müssen bei der Konzeptionierung gemäß der Anforderungen $A_{PT,1}$ und $A_{PT,2}$ bzw. dem Entwurfsschritt 1.1 sowie 1.2 (vgl. Abschnitt 5.3) neben der Vernetzung und den physikalischen bzw. logistischen Kopplungen zwischen dem Produkt und Prozess auch die erforderliche Flexibilität berücksichtigt werden.

Aus Sicht des Gesamtsystems sind für die Handhabung der gesamten Produktvarianz die Ebenen Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit erforderlich, d.h. die Zellen und Maschinen haben die Fähigkeit bzw. können diese durch Hard- und/oder Softwarerekonfiguration erwerben (siehe Abschnitt 2.1.2). Das System soll in der Lage sein die gleichen Fertigungsoperationen für unterschiedliche Kerzenlosgrößen durchzuführen, was durch die Dimension Kapazität beschrieben bzw. durch die Mengen- und Auftragsflexibilität ausgedrückt wird. Infolge der Produktvarianten ΔP_v ist eine Bandbreite an Funktionalität erforderlich die sich in den Dimensionen Varianz und Auflösung aufteilt. Dies kann in der Betriebsmittel- und Produktionsflexibilität berücksichtigt werden. Durch die Arbeitsplan- und Durchlaufflexibilität ist die Kerzenfertigung in der Lage die Kerzen hinsichtlich mehrerer möglicher Vorgangsfolgen durch die Fertigung zu bewegen.

Im Wesentlichen kann das bisherige Fertigungskonzept in vier Prozessschritte unterteilt werden, die in Bild 7-1 dargestellt sind. Der erste Prozessschritt [1] ist neben der Abwicklung des webbasierten Bestellmanagements für die Generation der Produktintelligenz zuständig. Auf Basis der vom Kunden übermittelten Bestellinformationen wie bspw. der Kerzenvariante, Bestellmenge und einem Design für das Etikett, generiert der Bestellservers die wesentlichen Prozess- und Produktinformationen, die vollständig oder nur zum Teil auf dem intelligenten Kerzenträger gespeichert werden.

Im Folgenden zweiten Prozessschritt [2], welcher in Unterprozesse aufgeteilt ist, wird das Kerzenglas auf dem Kerzenträger positioniert und anschließend bedocht. Bei der Glaspositionierung im Schritt [2.1], wählt der Roboter aus einem Magazin mit zwei unterschiedlichen Glasgrößen, das Erforderliche aus und setzt es in der dafür vorgesehenen Vertiefung auf dem Kerzenträger ab. Die benötigte Betriebsmittelflexibilität wird durch ein am Roboter montierten adaptiven Greifer erreicht, der in Abhängigkeit der Glasgröße rekonfiguriert wird. Im Anschluss wird mithilfe eines Zweiachsportals im Schritt [2.2] ein Docht innerhalb des gewählten Kerzenglases positioniert. Am Ende des Dochtes befindet sich ein Blechplättchen, welches durch einen im Kerzenträger integrierten Magneten, den Docht nach dem Absetzen in Position hält. Hier wird analog zu [2.1] die Betriebsmittelflexibilität zur Handhabung der zwei unterschiedlichen Dochtgrößen über eine rekonfigurierbare Spann- und Positionieraktork realisiert.

Der dritte Prozessschritt [3] dient der auftragsspezifischen Abfüllung und Einfärbung des aufgeheizten und flüssigen Paraffins. Innerhalb dieses Schrittes wird infolge der 32 möglichen Kerzenvarianten die maximale Betriebsmittelflexibilität der FZs bzw. Maschinen

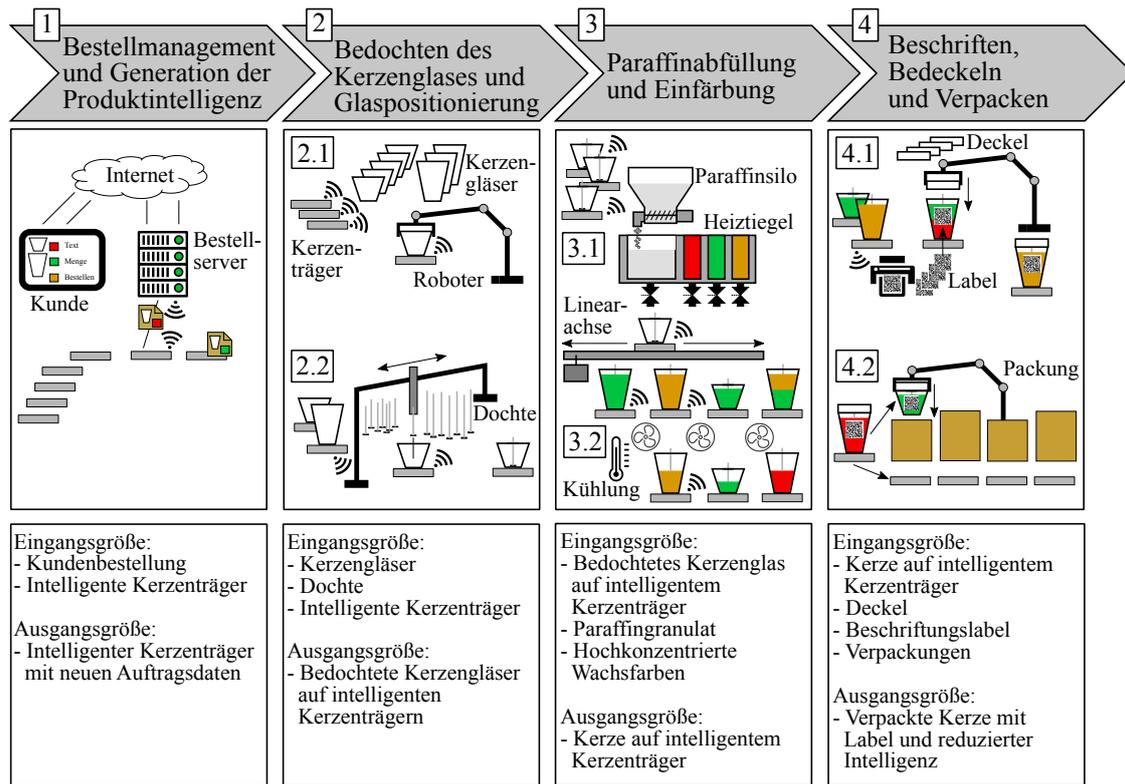


Bild 7-1: Prozessdarstellung der produkttoleranten Kerzenfertigung

benötigt. Im Unterprozess [3.1] wird in Abhängigkeit der in Tabelle 7-1 gezeigten Produktvarianz das bedochtete Kerzenglas mit flüssigem Paraffin und hoch dosierter Wachsfarbe befüllt. Zu Beginn wird das Glas erst mit einem Drittel der benötigten Paraffinmenge befüllt. Nachdem die hoch konzentrierte Wachsfarbe hinzugefügt wurde, werden die restlichen zwei Drittel des Paraffins nachgefüllt. Infolge der Turbulenzen während des Einfüllens erfolgt eine gleichmäßige Durchmischung mit der Wachsfarbe. Die Entwicklung und Realisierung der Wachsabfüllmaschine wird detailliert im Abschnitt 7.2 erläutert. Der Unterprozess Kühlung [3.2] wird benötigt, um die zweifarbigen Kerzen aus der Produktvarianz ΔP_v^B fertigen zu können. Hierbei werden die gewünschten Kerzen gemäß des Schrittes [3.1] bis zur Hälfte befüllt und eingefärbt. Anschließend werden die halb befüllten Kerzen in einen Kühlturm befördert, welcher eine Abkühlung des flüssigen Paraffins von etwa 60°C Abfülltemperatur auf circa 40°C ermöglicht. Anschließend werden die abgekühlten Glaskerzen zum Unterprozess [3.1] zurückgeführt und mit der zweiten Farbschicht befüllt.

Im Vierten und letzten Schritt [4] wird die kundenspezifische Beschriftung in Form eines geklebten Etiketts durchgeführt sowie das Bedeckeln und Verpacken des Glases vorgenommen. Beim Unterprozess [4.1] werden Kerzengläser, während sie auf die Bedeckelung durch den Roboter warten, mit einem gedruckten kundenspezifischen Etikett beklebt. Dies könnte z.B. wie im Bild 7-1 ein DataMatrix-Code mit hinterlegter Internetadresse oder ein beliebiges Bild bzw. Logo sein. Den Abschluss des Fertigungsprozesses bildet Schritt [4.2], indem die Glaskerzen vor der Auslieferung zum Kunden verpackt werden. Hierfür wird eine Betriebsmittelflexibilität benötigt, die es ermöglicht unterschiedliche Glaskerzengrößen in einer potenziellen Ein-Stück-Fertigung zu verpacken. Durch adaptive rekonfigurierbare

Faltvorrichtungen für unterschiedliche Glasgrößen werden die Verpackungen in Abhängigkeit der Kerzengröße gefaltet. Vor dem Schließen des Verpackungsdeckels positioniert ein Roboter die gefertigte Kerze im Inneren des Kartons.

Neben der zuvor beschriebenen Prozessdefinition, die in Bild 7-1 dargestellt ist, wird im Folgenden die Überführung der Prozessschritte sowie Unterprozesse in die im Abschnitt 4.3 definierte System- und Zellentopologie eines produktgesteuerten flexiblen Fertigungsprozesses beschrieben. Im Bild 7-2 ist die Topologie der Fertigungszellen für die produkttolerante Kerzenproduktion dargestellt.

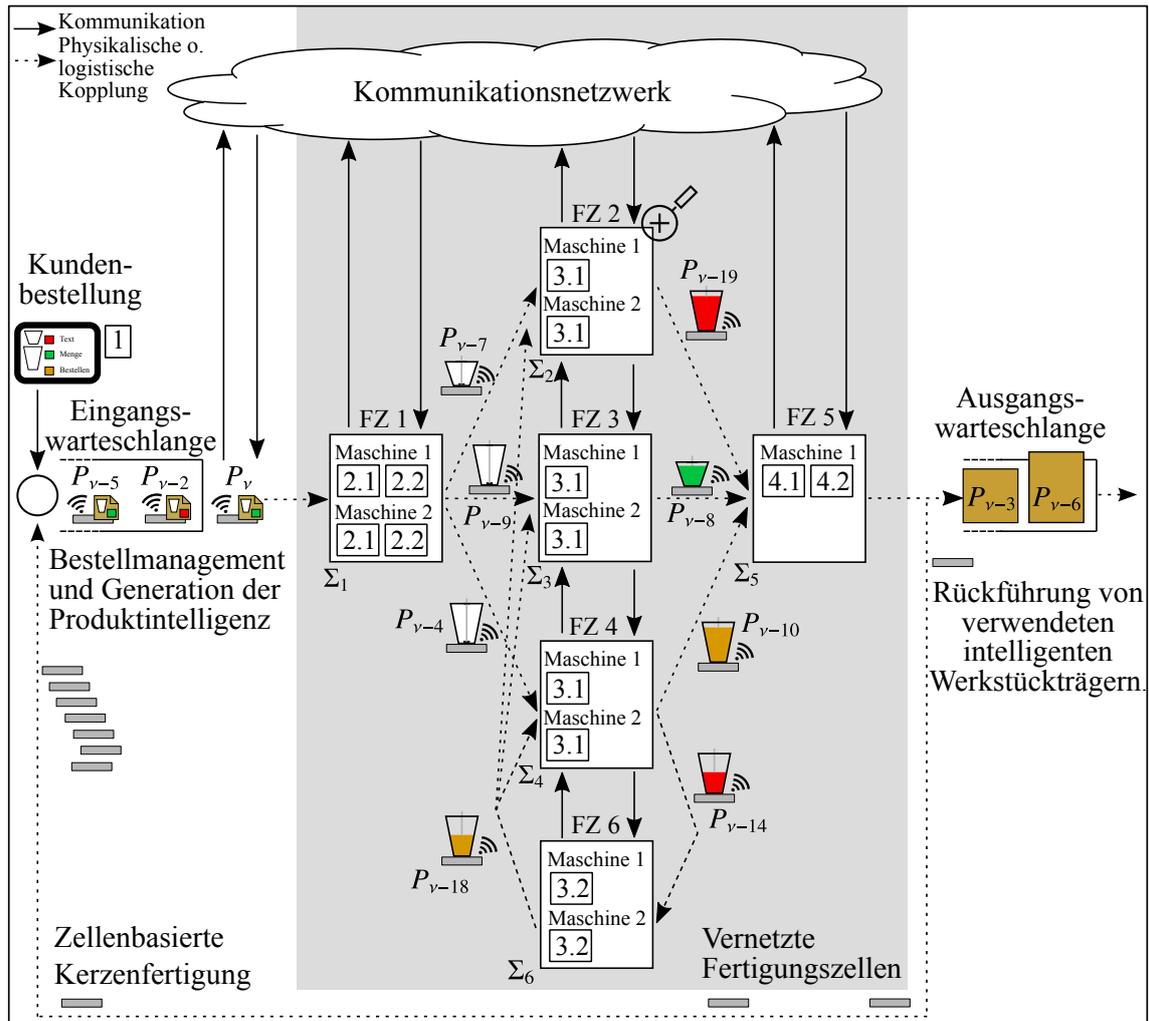


Bild 7-2: Zellentopologie der produkttoleranten Kerzenfertigung

Das gesamte Fertigungssystem besteht in der geplanten Maximalkonfiguration aus sechs FZs, die zur Herstellung der Produktvarianzen ΔP_v^A und ΔP_v^B benötigt werden. Der Fertigungsprozess jeder einzelnen Kerze beginnt mit der Kundenbestellung [1]. Aus den Auftragsdaten wird innerhalb der Eingangswarteschlange das Bestellmanagement und die Generation der Produktintelligenz durchgeführt. Zur dynamischen Planung wird die Eingangswarteschlange mithilfe des in Abschnitt 6.6.1 vorgestellten extHRRN Scheduling-Verfahrens organisiert. In Abhängigkeit der Verfügbarkeit von FZ 1 werden die zu fertigenden Glaskerzen-Aufträge in Form des intelligenten Kerzenträgers auf die zellinnere

Warteschlange zugewiesen. Innerhalb der FZ Σ_1 befinden sich zwei parallel angeordnete Maschinen, die jeweils in der Lage sind die Unterprozesse [2.1] und [2.2] nacheinander abzuarbeiten. Die Allokation der Produkte aus der zellinneren Warteschlange auf die Maschinen bzw. deren Eingangspuffer erfolgt durch das in Abschnitt 6.6.2 vorgestellte rtHRRN Scheduling-Verfahren. Nach der Glaspositionierung und dem Bedothen werden die intelligenten Kerzenträger auf die drei parallel angeordneten Fertigungszellen FZ 2, FZ 3 und FZ 4 zugewiesen. Jede der FZ verfügt über zwei parallel arbeitende Maschinen, die gemäß dem Unterprozess [3.1] für die Paraffinabfüllung und Einfärbung der bis zu 32 möglichen Kerzenvarianten benötigt werden.

Zur Fertigung der zweifarbigen Glaskerzen wird zusätzlich die Kühlzelle FZ 6 benötigt, die Produkte vom Ausgangspuffer der Zellen FZ 2, FZ 3 und FZ 4 mit einer entsprechenden Kühlzeit auf die zellinneren Eingangswarteschlangen zurückführt. Nach dem Beenden der beiden Unterprozessen [3.1] und [3.2] werden die Produkte der Eingangswarteschlange der FZ 5 zugewiesen. Hier werden sequenziell das Beschriften, Bedeckeln und Verpacken gemäß der Unterprozesse [4.1] sowie [4.2] vorgenommen. Im Anschluss werden die verpackten Produkte der Ausgangswarteschlange zugeführt, um auf ihren Abtransport zum Kunden zu warten. Die intelligenten Kerzenträger verbleiben im Fertigungskreislauf und stehen nach der Rückführung der Eingangswarteschlange zur Neukonfiguration zur Verfügung.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Gesamtkonzeptionierung des in Bild 7-1 und 7-2 gezeigten produkttoleranten Fertigungsprozesses. Bei der Entwicklung und Realisierung eines ersten realen Teilprototyps fiel die Wahl auf eine Wachsabfüllmaschine, da diese von allen zuvor beschriebenen Zellen bzw. Maschinen für die Umsetzung des Unterprozesses [3.1] mit der größtmöglichen Vielfalt von 32 Kerzenvarianten benötigt wird (siehe Abschnitt 7.2). Zudem war die Entwicklung eines intelligenten Kerzenträgers für eine erfolgreiche Prozessintegration erforderlich (siehe Abschnitt 7.3).

Das Bild 7-3 zeigt beispielhaft die FZ 2 mit zwei parallel angeordneten Wachsabfüllmaschinen $\Sigma_{2,1}$ und $\Sigma_{2,2}$. Alle von der FZ 1 bzw. FZ 6 ankommenden Produkte warten zunächst in der Zelleneingangswarteschlange, auf die Zuweisung zu den Wachsabfüllmaschinen $\Sigma_{2,1}$ und $\Sigma_{2,2}$ mittels des rtHRRN Scheduling-Verfahrens. Sofern die Maschinen nicht belegt sind, erfolgt die direkte Zuweisung. Im anderen Fall müssen die Produkte im Eingangspuffer warten, bis die Maschine den aktuellen Fertigungsschritt abgeschlossen hat. Jede Wachsabfüllmaschine verfügt über eine eigene vernetzte Steuer- und Regelungsstruktur $R_{2,1}$ und $R_{2,2}$ zur Sicherstellung der gewünschten Systemdynamik von den Maschineneinheiten $\Sigma_{2,1}$ und $\Sigma_{2,2}$. Nach Beendigung der Abfüllung und des Einfärbens werden die Kerzen zunächst in den Ausgangspuffer und anschließend in die FZ 5 bzw. FZ 6 transportiert. Die Vergrößerung im Bild 7-3 zeigt die vernetzte Steuer- und Regelungstopologie, in der das intelligente Produkt P_{v-6} ein aktives Element darstellt. Im Folgenden werden der Aufbau und die Realisierung einer Wachsabfüllmaschine im Detail beschrieben.

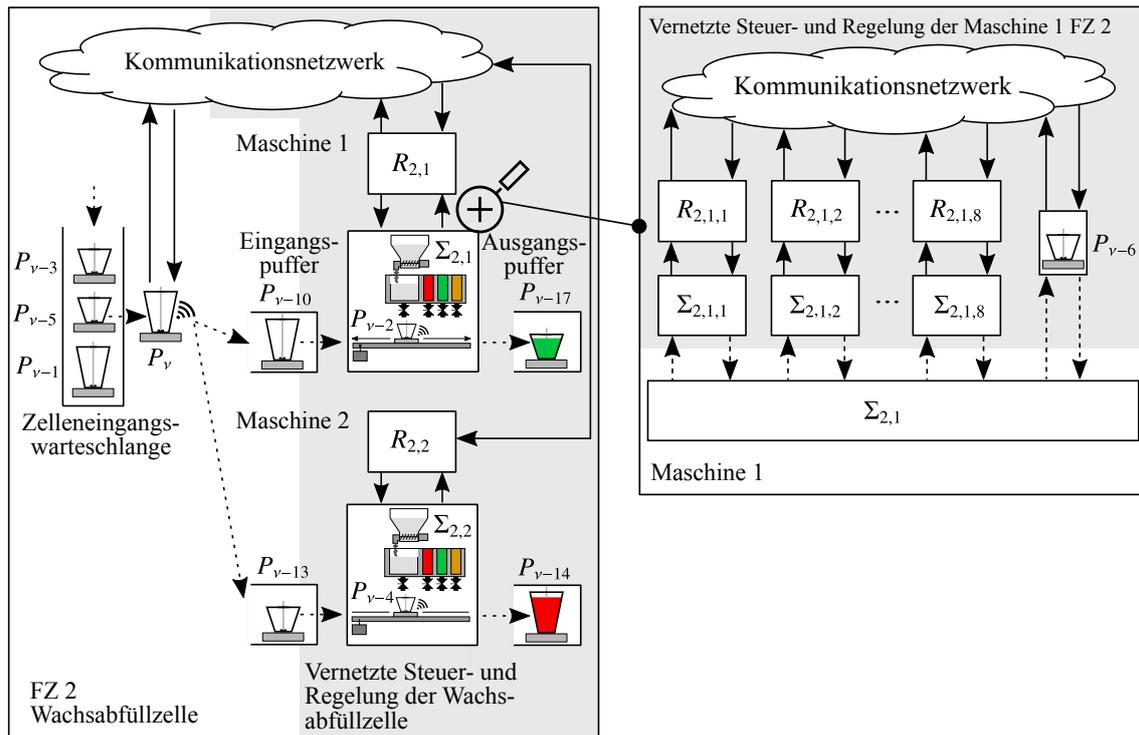


Bild 7-3: Maschinentopologie des Wachsabfüllprozesses (FZ 2) in der produkttoleranten Kerzenfertigung

7.2 Aufbau und Funktion der Wachsabfüllmaschine

Zur Untersuchung des Unterprozesses [3.1] zur Abfüllung von flüssigem und eingefärbtem Paraffin wurde der in Bild 7-4 dargestellte Prototyp der Wachsabfüllmaschine ① aufgebaut. Dieser besteht aus mehreren Teilsystemen, die nachfolgend erläutert werden. Ausgangsmaterial für jede Glaskerze ist ein Paraffingranulat mit einer 4 bis 5 mm Körnung und einer Schmelztemperatur von circa 55 °C, dessen Speicher in ⑤ dargestellt ist. Der Transport des Granulats in den Heitziegel erfolgt über eine Förderschnecke, die im unteren Bereich des Trichters integriert ist. Die Fördergeschwindigkeit ist hierbei über einen 12 V Gleichspannungsmotor mit Getriebe stufenlos einstellbar. Die gewünschte Menge des Paraffins fällt über die in ② dargestellte Rutsche in den Heitziegel, der auf circa 62 °C temperiert wird. Ebenso werden die drei Farbheitziegel ③ für das rote, grüne und gelbe paraffinbasierte Farbkonzentrat auf circa 62 °C temperiert. Insgesamt steht hierfür eine gesamte elektrische Heizleistung von etwa 400 W zur Verfügung, die über zehn im Boden der Heitziegel integrierte 40 W Heizpatronen erreicht wird. Die Tiegeltemperaturen und die Paraffingranulatabfüllung werden über die in ④ dargestellte Elektronik geregelt. Der Schaltschrank ⑥ beinhaltet neben der Energieversorgung, eine SPS für die Vernetzung der FZs über OPC-UA und die Leistungselektronik zur Ansteuerung des Schrittmotors für die Linearachse ⑨. Zudem befinden sich an der SPS einige analoge und digitale Ein- und Ausgänge zur Referenzierung der Linearachse sowie ein Ultraschallsensor ⑤ zur Erfassung des Wachspegels. Neben der Achse zum Positionieren des Kerzenglases zeigt ⑨ die vier Magnetventile, die zur Abfüllung des flüssigen Paraffins sowie der Farbkonzentrate benötigt werden. Die zeitbasierte Ansteuerung der Ventile erfolgt durch die mit ⑦ markierte Elektronik.

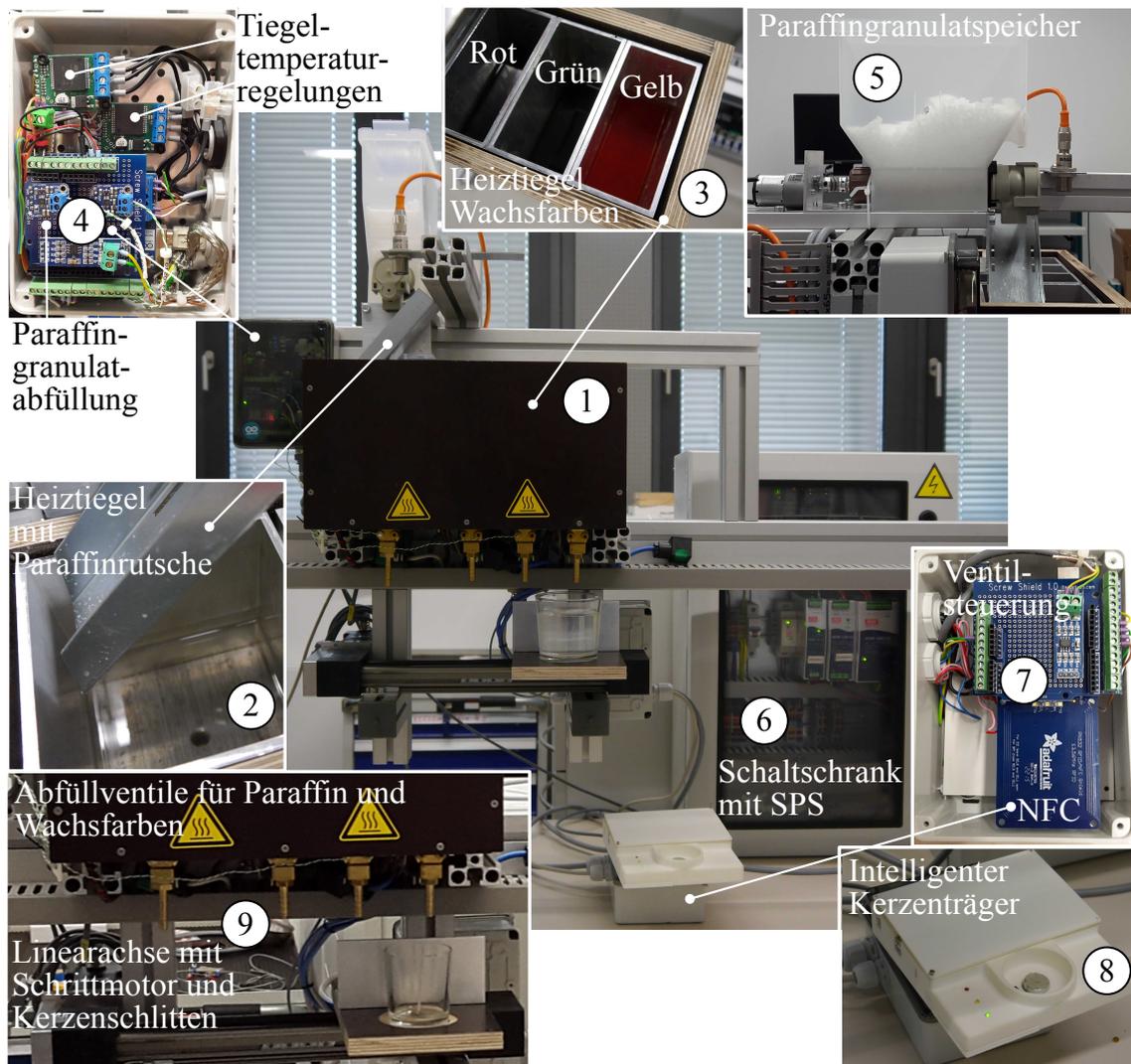


Bild 7-4: Prototypische Realisierung der Wachsabfüllmaschine

Zudem ermöglicht die Elektronik über eine NFC-Schnittstelle vom Typ Adafruit PN532 die Kommunikation und Interaktion mit dem intelligenten Produktträger ⑧. Hierdurch wird der Kerzenträger ein aktives Element in der vernetzten Steuerungs- und Regelungsarchitektur der Wachsabfüllmaschine, die in Bild 7-5 dargestellt ist. Des Weiteren erfolgt über die physikalische drahtlose Kommunikationsschnittstelle die Produktanbindung an das in Abschnitt 3.4 beschriebene DSM. Im Rahmen der Realisierung der Wachsabfüllmaschine gemäß der Anforderung $A_{PT,3}$ bzw. dem Entwurfsschritt 2.1 reduziert sich dieses auf die PPS, welche in Tabelle 7-2 gezeigt ist.

Sobald der intelligente Werkstückträger detektiert wird, findet eine Kommunikation bzw. Interaktion gemäß der in Abschnitt 5.2.2 definierten Strategie für Produkte mit On-board-Intelligenz zwischen dem Kerzenträger und der vernetzten Steuerungs- und Regelungsstruktur der Wachsabfüllmaschine statt (nach Entwurfsschritt 2.2 und 3.1 im Abschnitt 5.3). Hierbei gibt es Informationen die entweder einmalig zu Beginn der Fertigungsinstanz übertragen werden P_v^\uparrow , zyklisch während des gesamten Fertigungsschrittes P_v^\cup oder nach Beendigung des Prozesses P_v^\downarrow .

Tabelle 7-2: PPS zwischen Produkt und Wachsabfüllmaschine

Produkt-Prozess Schnittstelle (PPS)				
Daten	Typ	Wertbereich	Kommunikation	Richtung
PPS.ID	UINT16	0 ... 65536	P_v^\uparrow	→
PPS.Priorität	UINT8	0 ... 10	P_v^\uparrow	→
PPS.Größe	UINT8	0=:Klein, 1=:Groß	P_v^\uparrow	→
PPS.Färbung	UINT8	0=:Einfarbig, 1=:Zweifarbige	P_v^\uparrow	→
PPS.Farbe1	UINT8	0=:Weiß, 1=:Rot, 2=:Grün, 3=:Gelb	P_v^\uparrow	→
PPS.Farbe2	UINT8	0=:Weiß, 1=:Rot, 2=:Grün, 3=:Gelb	P_v^\uparrow	→
PPS.Temperatur	UINT8	0 bis 80 °C	$t_k = 1 \text{ s für } P_v^\cup$	→
PPS.Gewicht	UINT16	0 bis 500 g	$t_k = 1 \text{ s für } P_v^\cup$	→
PPS.Prozesszähler	UINT8	0 bis 255 Stationen	P_v^\uparrow	↔

Die PPS wird über ein tokenbasiertes Protokoll, welches auf dem RS485 Kommunikationsstandard basiert, allen autonomen Teilnehmern (TN) der vernetzten Steuerungs- und Regelungsstruktur (siehe Bild 7-5) zur Verfügung gestellt. Die Struktur bildet das Fundament für die Entwicklung und Implementierung der PTR, HR und HRG der jeweiligen Teilnehmer gemäß der Entwurfsphase 3.2 im Abschnitt 5.3.

Innerhalb des TN 2 sind zwei Regelungen und eine Steuerung implementiert. Mittels der internen Zähler des Arduino Mikrocontrollers wurde ein 20 ms Takt erzeugt, der als Zeitbasis für den 200 ms-Zyklus des Abfüllmotors und für die 1 s-Zeitscheibe der Temperaturregelungen dient. Über den PI-Regler $R_{2,1,1}$ wird die Temperatur ϑ_1 des Heiztiegels für das weiße Paraffin $\Sigma_{2,1,1}$ (siehe ②) auf einen Sollwert von $62 \pm 1^\circ \text{C}$ geregelt. Hierfür wurde ein kalibriertes Typ-K Thermoelement im Sitz des Ventils integriert. Das PWM-Ausgangssignal des Reglers $R_{2,1,1}$ führt auf eine Leistungselektronik (Typ VNH5019) welche die vier 40 W Heizpatronen im Boden des Heiztiegels versorgt. Aufgrund der thermischen Entkopplung zwischen dem Tiegel für das weiße Paraffin und den Tiegeln für die Wachsfarben werden über den PI-Regler $R_{2,1,2}$ die Temperatur ϑ_2 des mittleren Farbtiegels $\Sigma_{2,1,2}$ mit der gleichen Elektronikwahl und sechs 40 W-Heizpatronen auf $62 \pm 1^\circ \text{C}$ geregelt. In Abhängigkeit der vorgegebenen Abfüllzeit τ_{pf} und des aktuellen Füllstandes h_w legt die Steuerung $R_{2,1,3}$ mittels der Förderschnecke $\Sigma_{2,1,3}$ die nachzufüllende Paraffinmenge m_{pf} fest. Beim Unterschreiten einer minimalen Füllstandhöhe von $h_w = 30 \text{ mm}$ wird pro Minute für eine Dauer von mindestens $\tau_{\text{pf}} = 10 \text{ s}$ und maximal $\tau_{\text{pf}} = 60 \text{ s}$ nachgefüllt, bis der maximale Füllstand von 150 mm erreicht ist.

Der Teilnehmer TN 1 ist neben der Produktkommunikation bzw. der PPS Realisierung für die Ansteuerung der vier Abfüllventile zuständig. Als Zeitbasis dient ein 10 ms-Takt, der für

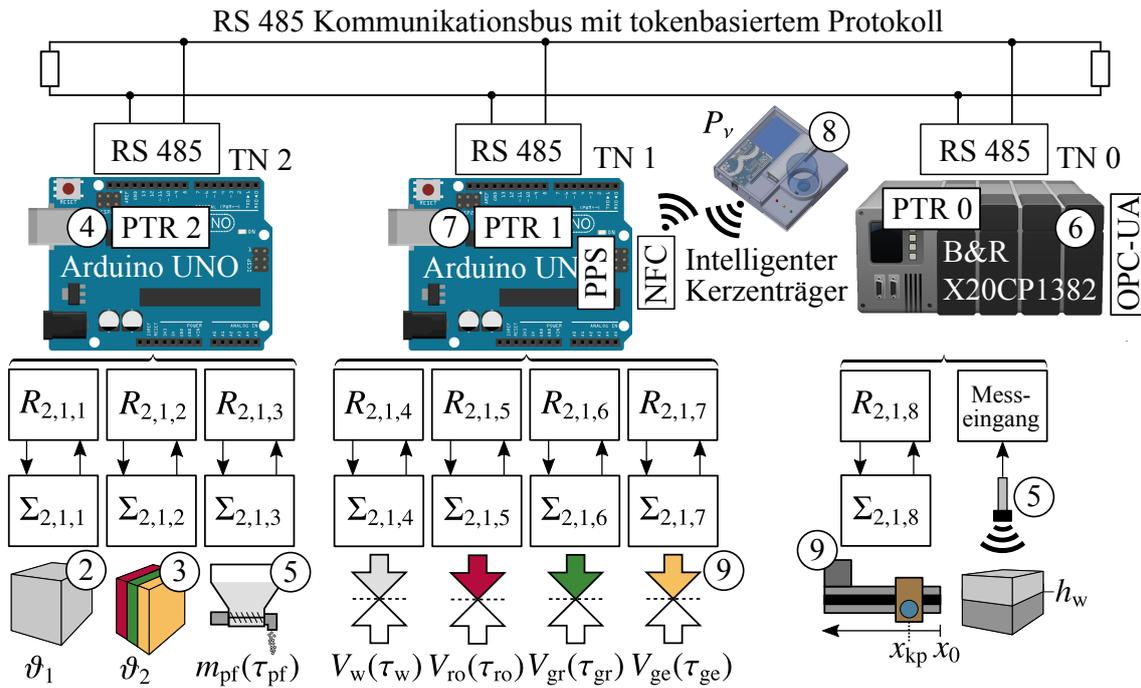


Bild 7-5: Vernetzte Steuer- und Regelungsstruktur der Wachsabfüllmaschine 1 innerhalb der Fertigungszelle 2

die Einhaltung der Schaltzeiten benötigt wird. Grundlegend für die Ventilansteuerung sind die Kerzengröße, Kerzenfärbung sowie die gewünschte Farbauswahl, welche über die PPS zur Verfügung stehen. Das Ventil V_w für die Abfüllung des geschmolzenen Paraffins hat eine Blende mit dem Durchmesser von 2,5 mm welche mit einer minimalen Schaltzeit von 180 ms geöffnet bzw. geschlossen werden kann (siehe Datenblatt im A1-8 und A1-9). Über die Steuerung $R_{2,1,4}$ wird der produktspezifische Öffnungszeitpunkt und die Schaltdauer τ_w des Ventils V_w vorgegeben. Die Entscheidung basiert auf der aktuellen Position x_{kp} des Kerzenglases, der Füllhöhe h_w des Tiegels $\Sigma_{2,1,4}$ und den Produktbedürfnissen. Für eine große Glaskerze wird eine gesamte Schaltdauer von $\tau_w = 30$ s verwendet. Im Falle einer farbigen großen Glaskerze wird zunächst ein Drittel der Zeit τ_w befüllt, anschließend erfolgt die Einfärbung über die Ventile V_{ro} , V_{gr} und V_{ge} . Final wird die erforderliche Restmenge des weißen Paraffins für die Dauer von 20 s eingefüllt. Aufgrund des halbierten Volumens der kleinen Glaskerzen im Vergleich zur Großen wird die Abfüllzeit τ_w ebenfalls um den Faktor Zwei auf 15 s reduziert. Zur Dosierung der hoch konzentrierten Wachsfarben in den Tiegel $\Sigma_{2,1,5}$ bis $\Sigma_{2,1,7}$ werden die drei Magnetventile V_{ro} , V_{gr} und V_{ge} verwendet, die über einen Blendendurchmesser von 1,6 mm und eine minimale Schaltzeit von 110 ms verfügen (siehe Datenblatt im A1-8 und A1-9). In Abhängigkeit, der vom Produkt vorgegebene Bedürfnisse (vgl. PPS. in Tabelle 7-2) und der aktuellen Kerzenposition x_{kp} werden die Farbventile über die Steuerungen $R_{2,1,5}$ bis $R_{2,1,7}$ bei einer großen Glaskerze für eine Dauer von $\tau_{ro} = \tau_{gr} = \tau_{ge} = 1$ s geschaltet. Für die kleine Glaskerze wird die Schaltdauer der Farbventile auf 500 ms reduziert.

Die Schnittstelle der Fertigungszelle 2 zum gesamten zellenbasierten Fertigungsprozess (siehe Bild 7-2) soll über den OPC-UA Standard erfolgen und wird über den TN 0, welcher durch eine handelsübliche B&R SPS vom Typ X20CP1382 realisiert ist, zur Verfügung gestellt. Zudem ist die Steuerung verantwortlich für die Generierung und Überwachung der tokenbasierten Kommunikation, des RS485 Buses (5 ms SPS-Zykluszeit). Grundlegend für die Funktionen des TN 2 und des TN 1 ist der aktuelle Füllstand des weißen Paraffins h_w , der vom Teilnehmer 0 über das vernetzte Kommunikationsprotokoll zur Verfügung gestellt wird. Die exakte Positionierung des Kerzenglases x_{kp} unterhalb der vier Abfüllventile wird über eine 30 cm lange Linearachse mit Riementrieb realisiert. Der Antrieb erfolgt hierbei über einen Schrittmotor, der über eine Schrittmotorklemme mit einem integrierten PI-Regler den Schlitten auf dem sich das Kerzenglas befindet, positioniert (1 ms Zykluszeit). Neben der Regelung für die Absolutposition, erfolgt zusätzlich eine Anpassung der Geschwindigkeiten in Abhängigkeit des Füllstandes im Kerzenglas. Für die Realisierung dieser Funktionen wurde ein PLCopen[®] Motion Control Funktionsbaustein für Schrittmotoren der Firma B&R verwendet. Zur Gewährleistung eines sicheren Abtropfvorgangs des Paraffins bzw. der Farbkonzentrate vom Ventilauslass, wartet der Schlitten zusätzliche für eine Dauer von 3 s, bevor die nächste Sollposition angefahren wird.

Ein wesentlicher Bestandteil in der vernetzten Steuerung und Regelung der Wachsabfüllmaschine ist der intelligente Kerzenträger, dessen Entwicklung und Realisierung in Anlehnung an die Anforderungen $A_{PT,3}$ und $A_{PT,4}$ bzw. den Entwurfsleitfaden (vgl. Abschnitt 5.3) im Folgenden beschrieben wird.

7.3 Aufbau und Funktion des intelligenten Kerzenträgers

Nach der abgeschlossenen Fertigung benötigt die Kerze keinerlei bzw. eine sehr geringe Intelligenz bspw. einen Bar- oder DataMatrix-Code für den fortlaufenden Produktlebenszyklus. Gemäß der Anforderung $A_{PT,4}$ aus Abschnitt 4.4.2 bzw. dem Entwurfsschritt 2.2 im Abschnitt 5.3 wurde für die Integration von Produktintelligenz innerhalb des produkttoleranten Kerzenfertigungsprozesses ein **intelligenter Werkstückträger** für den Transport der Kerzen gewählt. Eine wesentliche Anforderung an den Forschungsdemonstrator war die aktive Integration von intelligenten Produktträgern innerhalb der Steuerung und Regelung des Kerzenfertigungsprozesses. Aus diesem Grund musste der Werkstückträger selbst über eine **On-board Intelligenz** verfügen mit den minimalen Fähigkeiten: Identifikation, Datenspeicherung, Datenverarbeitung und optional der aktiven Interaktion. Dies entspricht einer **Produktintelligenz** der **3.** bzw. **4. Klasse** (siehe Kapitel 3). Die Differenzierung zwischen den beiden Klassen wird über zusätzliche Softwarekomponenten im intelligenten Werkstückträger ermöglicht und erfordert keine Änderungen an den Hardwarekomponenten.

In der Anforderung $A_{PT,5}$ ist die eigentliche Realisierung der Produktintelligenz in Abhängigkeit der Unterpunkte: Fähigkeiten, Entscheidungslokalität und Intelligenzträger definiert, welche als Grundlage für nachfolgend beschriebene Entwicklung dienen. Bei der Konzeptionierung des zellenbasierten Kerzenfertigungsprozesses wurde an allen wichtigen Entscheidungspunkten, d.h. beispielsweise in den globalen und zelleninternen Warteschlangen sowie vor den einzelnen Maschine eine drahtlose Kommunikationsschnittstelle für die PPS bzw. PDS (vgl. Abschnitt 3.4) vorgesehen. Als Kommunikationstechnologie wurde

der 13,56 MHz NFC Übertragungsstandard gewählt, der bei einem Schreib- sowie Leseabstand von ca. 10 cm eine stabile Kommunikation ohne Verbindungsabbrüche ermöglichte. Für die Realisierung der NFC-Schnittstelle im Kerzenträger wurde ein Adafruit PN532 NFC/RFID Controller Shield gewählt [BST16]. Dieses ist kompatibel mit dem 8-Bit Arduino UNO Mikrocontroller, auf dem die eigentliche Intelligenz des Werkstückträgers (Entscheidungslokalität und Intelligenzträger) implementiert wurde [BST16]. Diese umfasst im Wesentlichen die Kommunikation bzw. Interaktion mit dem Prozess, der FZ und der Maschine gemäß der in Abschnitt 5.2.2 definierten produktgetriggerten Kommunikation und Interaktion nur aus Sicht des Produktes. Hinzu kommen, die Speicherung von produkt- und prozessrelevanten Daten, die Zustandsvisualisierung über Leuchtdioden (LED) sowie die Auswertung von Sensorsignalen. Zur Erfassung des aktuellen Kerzengewichtes ist innerhalb des Kerzenträgers ein FlexiForce Drucksensor vom Typ A201 mit zugehörigem Messverstärker vom Typ Phidgets 1120 und einem maximalen Messbereich von 0,5 kg mit einer kalibrierten Messgenauigkeit von $\pm 5\%$ integriert. Für die Prozess- bzw. Kerzenglastemperaturerfassung verfügt der Werkstückträger über einen Temperatursensor vom Typ TMP35 mit einer kalibrierten Genauigkeit von $\pm 1^\circ\text{C}$.

Im Bild 7-6 a) ist ein 3D-Konstruktionsmodell des 130 mm tiefen, 110 mm breiten und 25 mm hohen intelligenten Kerzenträgers (IKT) dargestellt.

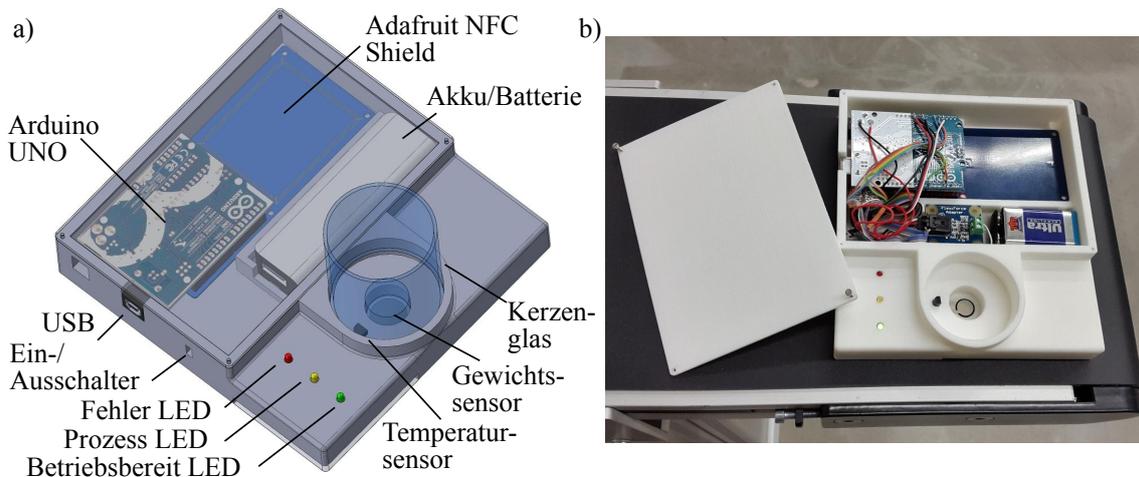


Bild 7-6: Aufbau des IKT a) als 3D-Konstruktionsmodell und b) als mit 3D-Druck gefertigter und voll funktionsfähiger erster Prototyp

Neben dem bereits erwähnten Arduino UNO und dem Adafruit NFC Shield wird die Energieversorgung über einen Akkumulator mit einer Kapazität von 2100 mAh bei 5 V Betriebsspannung versorgt. Dies ermöglicht eine Betriebszeit von ca. 20 Stunden. Wahlweise kann die Versorgung auch über eine handelsübliche 9 V Blockbatterie sichergestellt werden. Zur Visualisierung verfügt der WT über eine rote Fehler LED, eine Prozess LED und über eine Betriebsbereit LED. Das Kerzenglas wird über eine Vertiefung auf dem Träger arretiert. Zur Erfassung des Kerzengewichtes und der Temperatur sind an dieser Stelle die Sensoren positioniert. Das Bild 7-6 b) zeigt den mittels 3D-Druck hergestellten voll funktionsfähigen Prototypen, des intelligenten Kerzenträgers auf einem Transportband.

7.4 Fazit und Zusammenfassung

Innerhalb dieses Kapitels wurde gemäß der in Abschnitt 4.4.2 aufgestellten Anforderungen bzw. nach dem in Abschnitt 5.3 vorgestellten Entwurfsleitfaden eine zellenbasierte produkttolerante Kerzenfertigung konzeptioniert, die in der Lage ist 32 unterschiedliche Varianten zu produzieren. Zudem wurde ein realer Prototyp einer Wachsabfüllmaschine mit einer DSM basierten vernetzten produkttoleranten Steuer- und Regelung aufgebaut sowie ein funktional skalierbarer Kerzenträger (Klasse 3. und 4.) entwickelt.

Im Gegensatz zu einer klassischen Rezepturverwaltung eines Fertigungsszenarios, welche typischerweise innerhalb eines übergeordneten MES-Systems realisiert wird, erfolgt das Variantenmanagement in der produkttoleranten Kerzenfertigung durch Abstimmung der IKT mit den autonomen dezentralen Steuerungen und Regelungen. Hierdurch ist eine geringe Reaktionszeit der FZs und Maschinen auf Produktänderungen möglich. Gleichzeitig ist ein hohes Maß an Flexibilität sichergestellt.

Basierend auf den Ergebnissen und den Kapitel 5 bzw. 6 werden im nachfolgenden Kapitel werden die Anforderungen $A_{PT,6}$, $A_{PT,7}$ sowie $A_{PT,8}$ am Beispiel der produkttoleranten Kerzenfertigung angewendet. Hierbei werden gezielt die neuen Konzepte der produkttoleranten Steuer- und Regelungskonzepte und der dynamischen Prozessplanung appliziert, simuliert und validiert.

8 Applikation und Validierung in der produkttoleranten Kerzenfertigung

Dieses Kapitel zeigt eine abschließende Validierung am Beispiel der in Kapitel 7 beschriebenen Kerzenfertigung. Hierbei wird die im Abschnitt 5.2 erläuterte produkttolerante Steuer- und Regelung, die auf Basis des Entwurfsleitfadens (vgl. Abschnitt 5.3) entwickelt wurde, für die Wachsabfüllmaschine 1 der FZ 2 appliziert. Die beiden in den Abschnitten 5.4 und 5.5 gezeigten produkttoleranten Beispiele eines Transport- und Handlingszenarios können in späteren Ausbaustufen technologisch auf die Kerzenfertigung übertragen werden. Zudem wird das in Abschnitt 6.6 entwickelte dynamische Planungsverfahren extHRRN / rtHRRN im Rahmen einer Simulationsstudie für die zellenbasierte Kerzenfertigung für Produktvarianzen ΔP_v^A sowie ΔP_v^B (siehe Tabelle 7-1) untersucht und mit dem FCFS-, SPN- und normalen HRRN-Verfahren verglichen.

8.1 Applikation und Analyse der produkttoleranten Steuerungs- und Regelungsstruktur am Beispiel der Wachsabfüllmaschine

Für die Automation der Wachsabfüllmaschine wird die in Abschnitt 7.2 (siehe Bild 7-5) beschriebene vernetzte Steuer- und Regelstruktur verwendet. Diese besteht insgesamt aus acht einzelnen dynamisch oder logistisch gekoppelten dynamischen Teilsystemen zur Fertigung der unterschiedlichen Glaskerzen, von denen die vier Tiegel $\Sigma_{2,1,4}$ bis $\Sigma_{2,1,7}$ inklusive der Abfüllventile (V_w , V_{ro} , V_{gr} und V_{ge}) eine hybride Systemdynamik aufweisen [JGV11; HM03; Hod08; Mün06]. Gemäß der hybriden Phänomene aus Abschnitt 5.1.1 entspricht dies einem gesteuerten Umschalten.

Sobald ein Produktträger P_v an der NFC-Schnittstelle zum Zeitpunkt t_{bp}^b detektiert wird, erfolgt automatisch die Datenübertragung zwischen IKT und dem TN 1 (vgl. Bild 7-5). Der TN1 stellt unmittelbar nach erfolgreichem Empfang die Informationen, welche in Tabelle 7-2 als DSM dargestellt sind, über das tokenbasierte RS485-Protokoll allen anderen Teilnehmern zur Verfügung. Jeder der Teilnehmer verfügt über einen eigenen PTR der zunächst die empfangenen kerzenspezifischen Daten verarbeitet und im Anschluss die produktbasierte Rekonfiguration (siehe Abschnitt 5.2.2) der einzelnen lokalen Regelungen und Steuerungen im Sinne der Strategie der produkttoleranten Rekonfiguration für On-board Produktintelligenz vornimmt (siehe Bild 5-5).

Im Wesentlichen sind hiervon in Abhängigkeit der Produktvarianz der PTR des TN 1 und des TN 0 betroffen. Im TN 1 müssen in Abhängigkeit der Größe, Färbung und Farbe die Schaltzeiten der Steuerungen $R_{2,1,4}$ bis $R_{2,1,7}$ für die vier Abfüllventile angepasst werden. Das eigentliche Schalten der Ventile erfolgt erst, wenn vom TN 0 die erfolgreiche kerzenspezifische Positionierung gemeldet wird. Der PTR des TN 0 entscheidet ebenfalls auf Basis von Größe, Färbung und Farbe, welche Positionen für die Fertigung der aktuellen Kerze benötigt werden. Zur Abfüllung von weißem Paraffin wird das Kerzenglas auf die Position $x_{kp} = 187$ mm geregelt. Für die rote Einfärbung auf $x_{kp} = 95$ mm. Bei Grün sind es 31 mm und die gelbe Position, welche gleichzeitig zur Initialisierung dient, liegt

bei 0 mm. Die Weiterbeförderung der Kerze zur nächsten Sollposition erfolgt immer erst nachdem der TN 1 die erfolgreiche Abfüllung quittiert hat. Neben der Sollposition wird in Abhängigkeit des Kerzenglasfüllstandes die maximale Geschwindigkeit der Linearachse angepasst. Diese variiert zwischen 345 mm/s für ein leeres Glas, 115 mm/s für ein zum Drittel gefülltes Glas und 95 mm/s für ein volles Glas. Die Werte wurden durch Untersuchungen am Prüfstand experimentell ermittelt. Auf Basis des vom Ultraschallsensor gemessenen und vom TN 0 versendeten Füllstands des Wachspegels trifft der TN 2 Entscheidungen für das Temperieren und Nachfüllen der Tiegel.

Das Bild 8-1 zeigt die Positionierung einer großen gelben Kerze innerhalb der Wachsabfüllmaschine und eine Analyse der Kommunikation auf dem RS 485-Bus durch die Token-Zykluszeit τ_{485} . Zum Zeitpunkt ① im Bild 8-1 d) erfolgt die manuelle Aktivierung der NFC-Kommunikation am TN 1, was eine Erhöhung der über eine Sekunde gemittelten Token-Zykluszeit zur Folge hat.

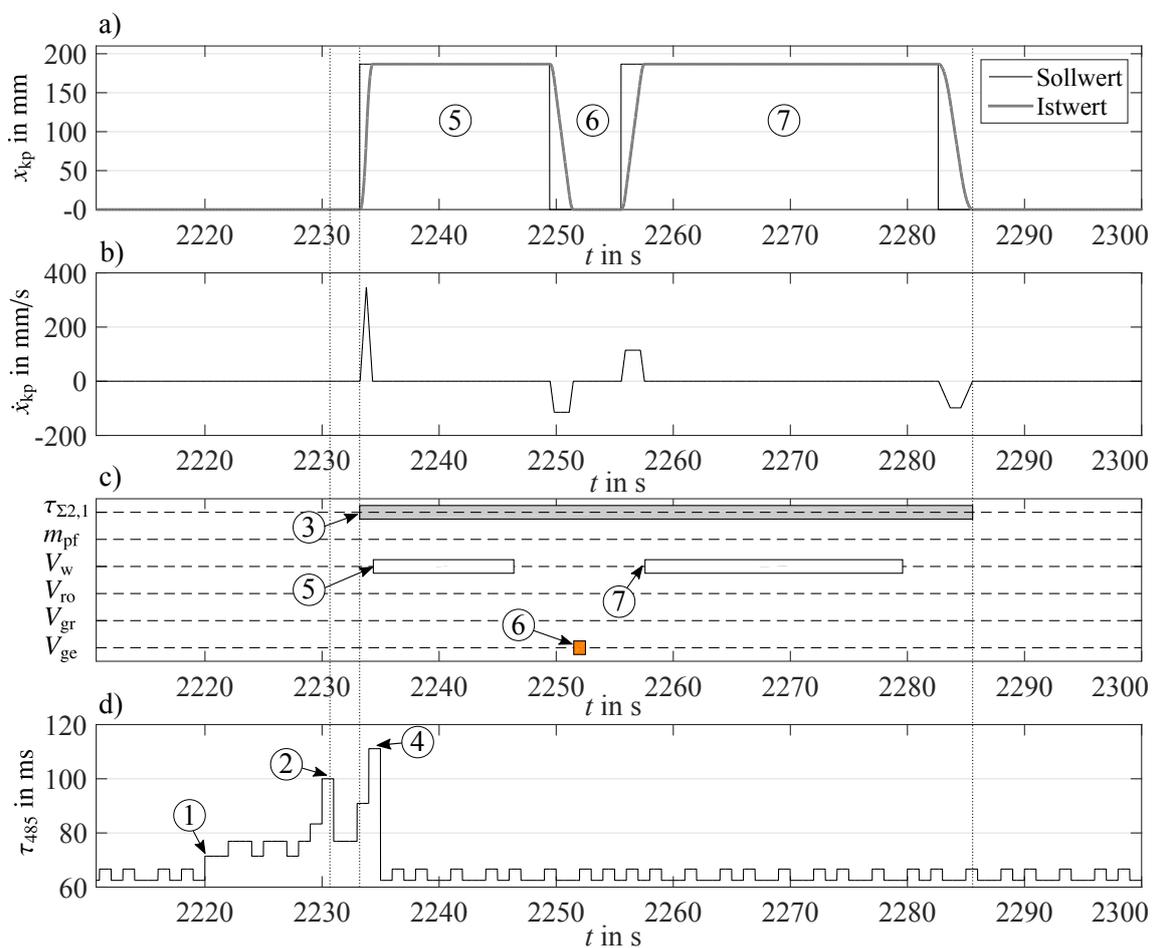


Bild 8-1: Positionierung einer großen gelben Kerze innerhalb der Wachsabfüllmaschine und Analyse der Tokenzykluszeit: a) Kerzenposition x_{kp} , b) Kerzengeschwindigkeit \dot{x}_{kp} , c) Prozess und Abfüllvorgang d) RS485 Tokenzykluszeit τ_{485} .

Der mit ② markierte Zeitpunkt zeigt die Detektion eines intelligenten Kerzenträgers im Kommunikationsbereich der NFC-Schnittstelle. Hierdurch verbleibt der Token eine längere Dauer im Besitz des TN 1 und τ_{485} steigt an. Im Anschluss erfolgt die vollautomatische Verteilung der produktspezifischen Daten an alle Teilnehmer. Im Vergleich

zum TN 1 und TN 2 (8-Bit Arduino Mikrocontroller) verfügt die SPS über wesentlich mehr Rechenperformanz und einen separaten RS485-Schnittstellencontroller. Nachdem der TN 0 alle Daten erhalten hat, erfolgt die Rekonfiguration durch den PTR innerhalb der SPS-Zykluszeit von 1 ms und der Prozess wird gestartet ③ (siehe Bild 8-1 c)). Infolge der eigenen Rekonfiguration des TN 1, der aktivierten Kommunikation mit dem Kerzenträger und der Abstimmung mit dem TN 0 (siehe ④) erhöht sich die Zykluszeit auf bis zu 117 ms. Im Schritt ⑤ erfolgt zunächst die geregelte Positionierung des Kerzenglases auf $x_{kp} = 187$ mm mit den maximal zulässigen Geschwindigkeiten (vgl. Bild 8-1 b)) und die erste Abfüllung des weißen Paraffins (siehe Bild 8-1 a)). Der Abschnitt ⑥ kennzeichnet die Positionierung auf $x_{kp} = 0$ mm und die Abfüllung des gelben Farbkonzentrats für die Dauer von einer Sekunde. Nachdem das Farbkonzentrat eingefüllt wurde, wird im Schritt ⑦ die restliche Menge an weißem Paraffin ins Glas gefüllt und das Glas von der Abfüllposition nur Entnahmeposition $x_{kp} = 0$ mm verfahren.

Das Bild 8-2 zeigt die Pegelhöhe des weißen Paraffins, die Änderung des Pegels in Abhängigkeit der Zeit und den bereits beschriebenen Abfüllprozess für eine große gelbe Kerze (vgl. Bild 8-2 c)). Im Bild 8-2 a) ist, neben der über den Ultraschallsensor gemessenen Pegelhöhe, der berechnete Effektivwert und der Minimalpegel von 30 mm eingezeichnet.

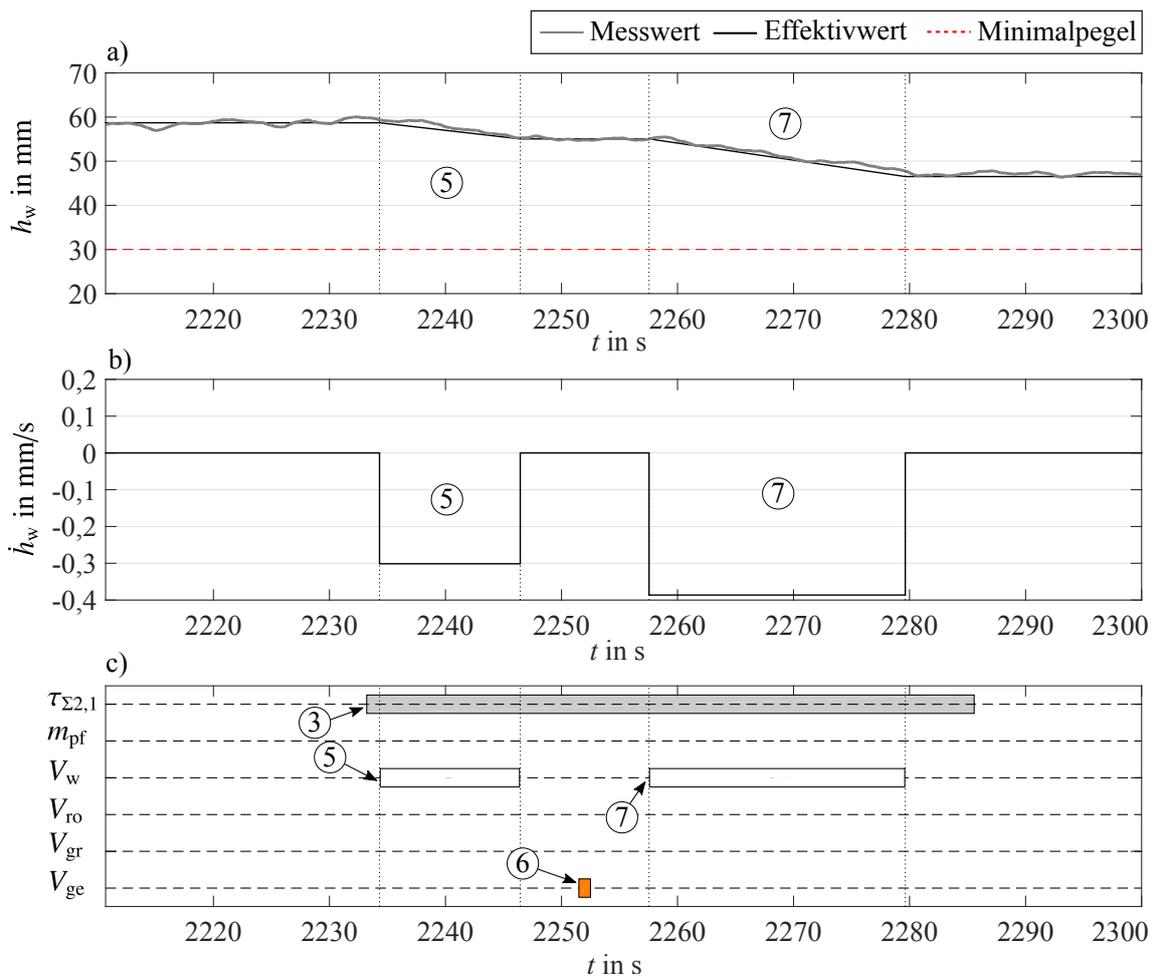


Bild 8-2: Abfüllung des flüssigen Paraffins für eine große gelbe Kerze: a) Pegel des weißen Paraffins h_w , b) Änderung des Pegels \dot{h}_w und c) Prozess und Abfüllvorgang.

Um die Störungen und Messungenauigkeiten zu kompensieren, wird abschnittsweise der Effektivwert berechnet, weil der Füllstand sich im fehlerfreien Betrieb nur durch Ereignisse wie das Abfüllen oder das Nachfüllen von Paraffin granulat ändern kann. Basierend auf dem berechneten Effektivwert ist in Bild 8-2 b) die Pegeländerung dargestellt, welche näherungsweise konstant ist für die Schaltdauer τ_w des Ventils V_w .

Das Bild 8-3 zeigt ergänzend zum detailliert beschriebenen Fertigungsablauf einer großen roten Kerze den Abfüllprozess für eine große rote Glaskerze.

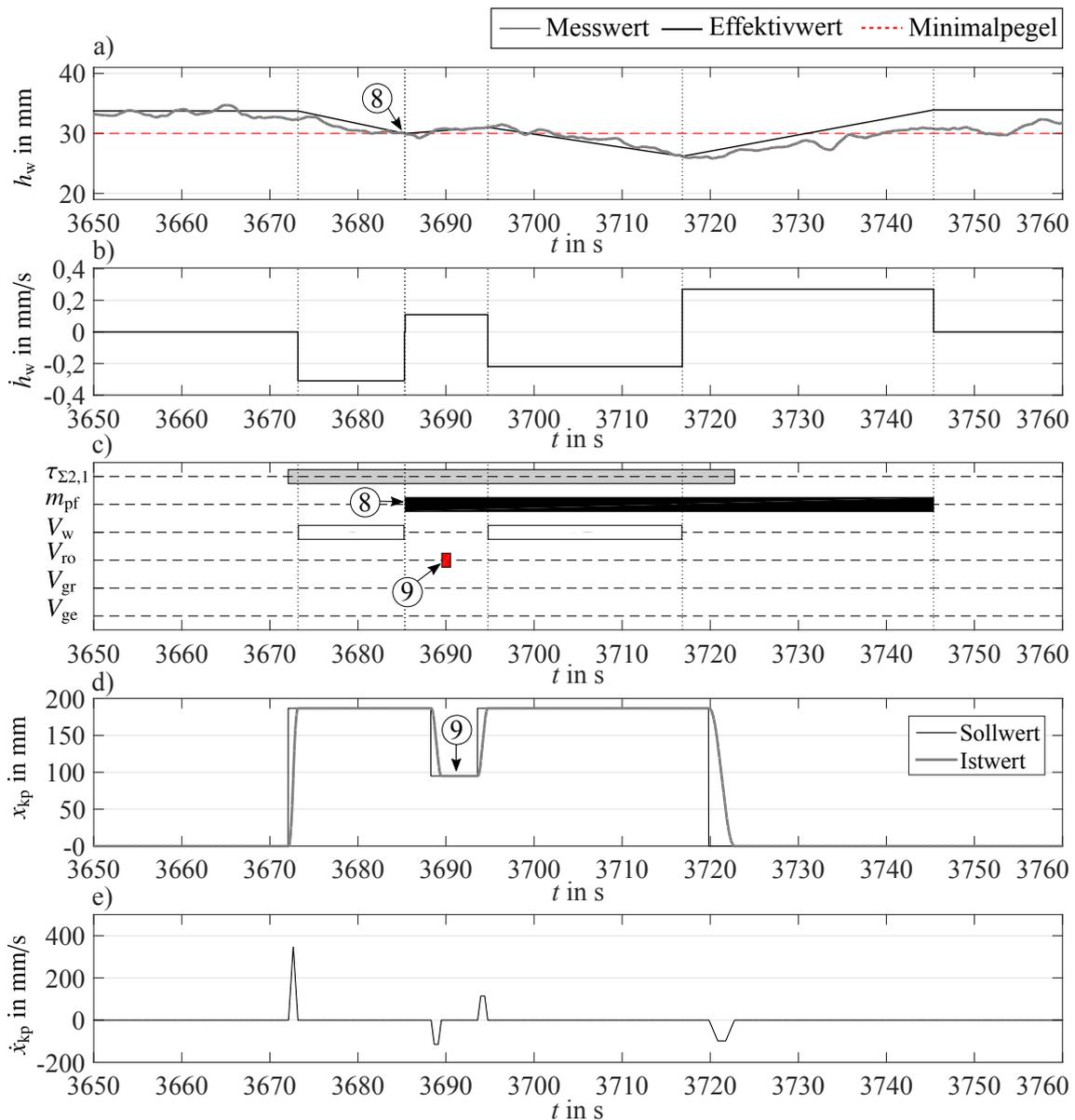


Bild 8-3: Positionierung und Wachsabfüllung einer großen roten Kerze mit Paraffinzufuhr: a) Pegel des weißen Paraffins h_w , b) Änderung des Pegels \dot{h}_w , c) Prozess und Abfüllvorgang, d) Kerzenposition x_{kp} und e) Kerzengeschwindigkeit \dot{x}_{kp} .

Zum Zeitpunkt ⑧ unterschreitet der Pegel des weißen Paraffins erstmals den minimalen Pegel von 30 mm (siehe Bild 8-3 a)). Auf Basis des vom TN 0 über den RS485-Bus in regelmässigen Abständen gesendeten Füllstands h_w trifft der TN 2 die Entscheidung zum

Nachfüllen von Paraffingranulat. Dies ist in Bild 8-3 c) für die Paraffinmengen Zufuhr m_{pf} dargestellt. Hierbei wird die Förderschnecke $\Sigma_{2,1,3}$ für eine Dauer von $\tau_{pf} = 60$ s aktiviert. Parallel dazu läuft der Prozess für Positionierung und Abfüllung der großen roten Kerze, welcher durch ⑨ markiert ist. Zur Einfärbung wird das Ventil V_{ro} angesteuert, welches sich an der Abfüllposition $x_{kp} = 95$ mm befindet. Aus dem Verlauf der Pegeländerung (siehe Bild 8-3 b) sind die Zufuhr des Granulates bzw. das Abfüllen des geschmolzenen Paraffins mit positiven und negativen Ausschlägen zu erkennen.

Im Bild 8-5 ist der Abfüllprozess einer großen grünen Kerze dargestellt. Insbesondere in den Bildern 8-5 c) und d) ist mit der ⑩ der Schaltvorgang des grünen Ventils V_{gr} markiert, welches für eine Dauer von $\tau_{gr} = 1$ s für die Abfüllung des Farbkonzentrates geöffnet wird. Des Weiteren ist die kerzenabhängige Positionierung zur grünen Einfärbung auf die Position $x_{kp} = 31$ mm dargestellt.

Das Bild 8-4 zeigt kleine und große Glaskerzen in unterschiedlichen Farben, die mit der Wachsabfüllmaschine (siehe Abschnitt 7.2) und dem IKT gefertigt wurden.



Bild 8-4: Kleine und große Glaskerzen in unterschiedlichen Farben

Zusammenfassung und Zwischenfazit

Durch die Automation der Wachsabfüllmaschine für die FZ 2 konnte, neben den beiden zuvor gezeigten Anwendungsbeispielen (siehe Abschnitt 5.4 und 5.5), unter Berücksichtigung der Anforderungen und dem Entwurfsleitfaden ein drittes Anwendungsszenario aufgezeigt werden. Dies umfasst eine produkttolerante **vernetzte** Steuer- und Regelung bestehend aus drei Teilnehmern und einem intelligenten Kerzenträger (On-board PI Klasse 3 in der aktuellen Konfiguration). Im Beispiel wurde nicht nur eine Steuer- bzw. Regelung flexibel an die Bedürfnisse des Produktes im Sinne einer Ein-Stück-Fertigung angepasst, sondern eine komplette Maschine mit drei kooperierenden PTRs.

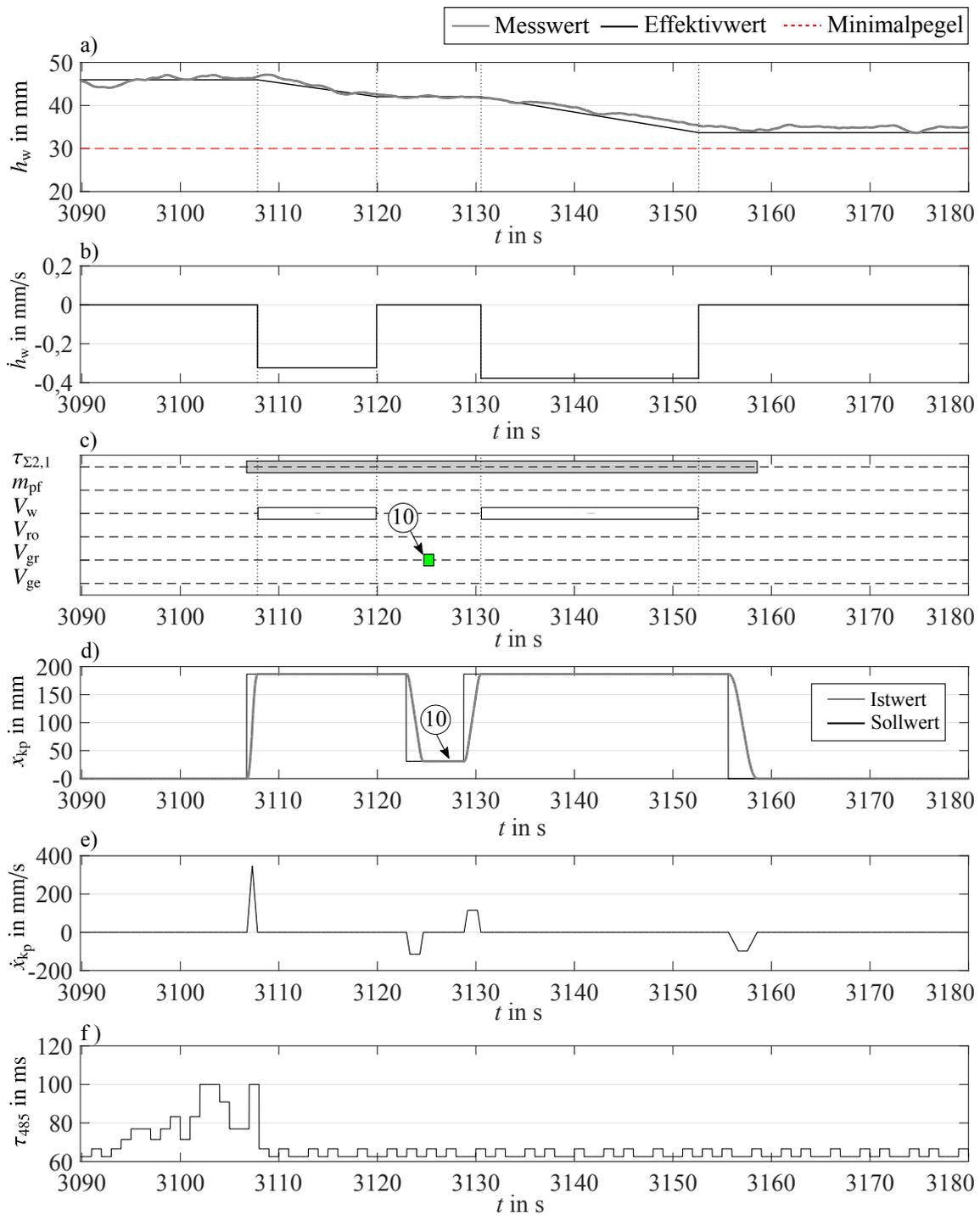


Bild 8-5: Positionierung und Wachsabfüllung einer großen grünen Kerze: a) Pegel des weißen Paraffins h_w , b) Änderung des Pegels \dot{h}_w , c) Prozess und Abfüllvorgang, d) Kerzenposition x_{kp} , e) Kerzengeschwindigkeit \dot{x}_{kp} und f) RS485 Tokenzykluszeit τ_{485} .

8.2 Analyse der dynamischen Prozessplanung für die produkttolerante Kerzenfertigung

Innerhalb dieses Abschnittes wird die im vorherigen Kapitel 7 beschriebene produkttolerante Kerzenfertigung innerhalb einer Simulationsstudie²³ untersucht. Gesamtheitlich wird eine Dauer von **circa 56 Wochen Fertigung**, bei sieben Arbeitstagen pro Woche im Dreischichtbetrieb, abbildet. Grundlegend für die Simulation, ist der in Abschnitt 6.7 vorgestellte Simulationsumgebung unter MATLAB mit der Microsoft Excel Benutzerschnittstelle. Darin abgebildet ist der in Abschnitt 7.1 vorgestellte Fertigungsprozess, bestehend aus der in Bild 7-2 dargestellten Zellentopologie. In Abhängigkeit der zu fertigenden minimalen Produktvarianz ΔP_v^A bzw. der Ergänzung um ΔP_v^B (vgl. Tabelle 7-1) werden die Fertigungszellen Σ_1 bis Σ_5 bzw. zusätzlich die Kühlzelle Σ_6 benötigt.

Im Folgenden werden detailliert die Konfiguration der Simulationsumgebung und das generelle Vorgehen bei der Simulationsstudie beschrieben. Anschließend werden detailliert die Simulationsergebnisse für die minimale und maximale Produktvarianz für vier unterschiedliche Planungsverfahren verglichen.

8.2.1 Parametrisierung der Simulationsumgebung

Die Tabelle 8-1 zeigt die Parametrisierung der in Bild 7-2 gezeigten Topologie der produkttoleranten Kerzenfertigung. Im Detail sind die angenommenen Transportzeiten zwischen den Zellen Σ_1 bis Σ_6 , die Bearbeitungszeit der zellinternen Maschinen $\tau_{\Sigma_n,1}$ bzw. $\tau_{\Sigma_n,1}$, die abgeschätzten Werkzeugwechselzeiten τ_{rt} infolge der Handhabung unterschiedlicher Glasgrößen und die zellinterne Warteschlangengröße W_{Σ_n} dargestellt.

Die Bearbeitungszeiten für die Wachsabfüllmaschinen der FZs Σ_2 , Σ_3 und Σ_4 wurden zur Herstellung der Produktvarianz ΔP_v^A experimentell am realen Prototypen (siehe Abschnitt 7.2) ermittelt und auf eine volle Sekunde gerundet, da die Simulation mit einer zeitlichen Diskretisierung von **einer Sekunde als Zeitbasis** arbeitet. Zur Herstellung von Kerzen der Produktvarianz ΔP_v^B wurden aufgrund des halbierten Paraffinvolumens, die Prozesszeiten der Wachsabfüllmaschinen durch den Faktor Zwei geteilt. Ebenso wurde das Abkühlverhalten für Festlegung der Bearbeitungszeit der FZ Σ_6 an einer halbvollen kleinen und großen Glaskerze bei Raumtemperatur untersucht. Nach ca. 5 bzw. 10 Minuten ist das flüssige Paraffin an der Oberfläche mit einer Temperatur zwischen 40° C und 45° C derart erstarrt, dass eine zweite Farbschicht darauf gefüllt werden konnte. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass zu schnelle Abkühlvorgänge bspw. durch Eiswasser zu unerwünschten Kavitäten im Paraffin führten, so dass das Abbrennverhalten negativ beeinflusst wird. Aus diesem Grund wird ein langsames Abkühlen bei Raumtemperatur bevorzugt. In Tabelle 8-1 sind Größen, die für die Fertigung der Produktvarianz ΔP_v^B erforderlich sind, grau unterlegt. Bei der globalen Warteschlange mit der Größe $W_G = 500$ Plätze handelt es sich um eine virtuelle Warteschlange. Kurz bevor das zu fertigende Produkt P_v in die Fertigung geschleust wird, erfolgt die Generierung der Produktintelligenz (siehe Bild 7-2) mittels des in Abschnitt 7.3 beschriebenen realen intelligenten Kerzenträgers und dem in Tabelle 7-2 gezeigten DSM.

²³Verwendeter Desktop PC: Intel Core i7 Prozessor, 8 GB RAM, 500 GB Festplatte mit MATLAB 2015a (32-Bit) und Microsoft Excel 2016.

Tabelle 8-1: Definition der Transport-, Maschinenbearbeitungs- und Werkzeugwechselzeiten für die zellenbasierte Kerzenfertigung

τ_t	Σ_1	Σ_2	Σ_3	Σ_4	Σ_5	Σ_6	$\tau_{\Sigma n,1}$	$\tau_{\Sigma n,2}$	τ_{rt}	$W_{\Sigma n}$
Σ_1	0 s	1 s	1 s	1 s	3 s	1 s	6 s	6 s	1 s	5
Σ_2	1 s	0 s	1 s	1 s	2 s	1 s	KK w: 21 s	s. $\tau_{\Sigma 2,1}$	/	3
							KK ro: 30 s		/	
							KK gr: 31 s		/	
							KK ge: 32 s		/	
							GK w: 42 s		/	
							GK ro: 50 s		/	
							GK gr: 51 s		/	
							GK ge: 52 s		/	
Σ_3	1 s	1 s	0 s	1 s	2 s	1 s	s. $\tau_{\Sigma 2,1}$	s. $\tau_{\Sigma 2,1}$	/	3
Σ_4	1 s	1 s	1 s	0 s	2 s	1 s	s. $\tau_{\Sigma 2,1}$	s. $\tau_{\Sigma 2,1}$	/	3
Σ_5	3 s	2 s	2 s	2 s	0 s	2 s	6 s	/	2 s	10
Σ_6	1 s	1 s	1 s	1 s	2 s	0 s	KK: 300 s	GK: 600 s	/	3

KK: kleine Kerze, GK: große Kerze, w: weiß, ro: rot, gr: grün, ge: gelb

Für eine belastbare Aussage hinsichtlich der Performanz und Güte, der in Abschnitt 6.6 erstmals gezeigten Erweiterung des HRRN zum extHRRN bzw. rtHRRN, wird im Folgenden die Konfiguration des zufallsbasierten Produktgenerators (siehe Abschnitt 6.7) beschrieben. Die Tabelle 8-2 zeigt die Zufallsgrößen und ihren Wertebereich. Die Kundenbestellung beinhaltet eine generierte Losgröße L_B , der zufällig eine Ankunftszeit t_0 und Priorität ρ zugeordnet werden. In Abhängigkeit von L_B werden die für die Bestellung notwendigen Kerzen generiert. Über die zufällige Kerzengröße, Farbkombination, Farbe 1 und Farbe 2 sind die in Tabelle 7-1 gezeigten Varianzen ΔP_v^A und ΔP_v^B im Produktgenerator abgebildet. Für den Fall, dass bei einer zweifarbigen Kerze, die Farbe 1 und Farbe 2 identisch sind, generiert der PG solange Farbkombinationen bis, diese sich unterscheiden. Sobald alle Kerzen für ein Los generiert wurden, wird eine neue Bestellung mit zufälliger Losgröße L_B ausgelöst.

Tabelle 8-2: Gleichverteilte zufällige Variabilität des Produktgenerators

Zufallsgröße	Wertebereich
Losgröße	$L_B = \{1, 2, 3, 4, 5\}$
Ankunftszeit	$t_0 = \{1, 2, 3, 4, \dots, t_{0,\max}\}$
Priorität	$\rho = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$
Kerzengröße	{0:='kleine Kerze', 1:='große Kerze'}
Farbkonfiguration	{0:='einfarbig', 1:='zweifarbige'}
Farbe 1	{0:='weiß', 1:='rot', 2:='grün', 3:='gelb'}
Farbe 2	{0:='weiß', 1:='rot', 2:='grün', 3:='gelb'}

Essenziell für die Simulationsstudie ist die Bestellrate λ_B , die angibt, wie viele durch den PG generierte Bestellungen bis zum Erreichen der maximalen Ankunftszeit $t_{0,\max}$ in Auftrag gegeben werden sollen. Bei acht bzw. 32 unterschiedlichen Kerzenvarianten ergibt sich unter Annahme einer Gleichverteilung und unter Berücksichtigung der Fertigungszellen mit den größeren Prozesszeiten (Σ_2 , Σ_3 und Σ_4) eine durchschnittliche Bearbeitungszeit der Wachsabfüllmaschine von 38,6 s. Bei einer maximalen Ankunftszeit von $t_{0,\max} = 1.000$ s werden im Durchschnitt $N_{KE} = 25,9$ Kerzen gefertigt. Die drei Fertigungszellen verfügen insgesamt über 6 Wachsabfüllmaschinen (vgl. Bild 7-2), somit können infolge der parallelen Anordnung im Durchschnitt $N_{KE} = 155,4$ Kerzen innerhalb $t_{0,\max} = 1.000$ s produziert werden. Diese Abschätzung berücksichtigt **nicht** das dynamische Verhalten wie bspw. Warteschlangen, Maschinenauslastung, Werkzeugwechsel und Blockaden. Zudem wurde das zufällige Verhalten des Produktgenerators, d.h. die Produktvarianz vernachlässigt. Die Tabelle 8-3 zeigt die abgeschätzte Bestellrate und Kerzenanzahl in Abhängigkeit der zufällig generierten Losgröße einer Bestellung.

Tabelle 8-3: Abschätzung der Bestellrate

Losgröße L_B	1	2	3	4	5
Bestellrate λ_B in $\frac{\text{Best.}}{10^3 \text{ s}}$	155,4	77,7	51,8	38,9	31,1
Kerzenanzahl N_{KE} pro 10^3 s	155,4	155,4	155,4	155,6	155,6

Unter der Annahme, dass bei einer Gleichverteilung im Mittel eine Losgröße von 3 für eine Bestellung durch den PG generiert wird, ist es zielführend die Realisierbarkeit einer Bestellrate von abgerundet $\lambda_B \approx 51 \frac{\text{Best.}}{10^3 \text{ s}}$ simulativ anhand des FCFS-Verfahrens zu untersuchen. Analog zu Latip et al. [LI11] wird der FCFS-Scheduler als denkbar einfachstes zu realisierendes Referenzverfahren ausgewählt. Über die Bestellrate wird eine möglichst hohe Fertigungsauslastung eingestellt, die durch das FCFS-Verfahren geplant wird. Für die Untersuchung wurde die maximale Ankunftszeit, in der die Kerzen zufällig in der globalen Warteschlange ankommen, auf $t_{0,\max} = 10.000$ s festgelegt. Gleichzeitig wurde die Bestellrate λ_B im Bereich zwischen 45 und 51 Bestellungen pro 1.000 Sekunden variiert. Bei jeder Bestellrate wurden zehn Iterationen der Simulationen durchgeführt und daraus eine durchschnittliche Antwortzeit in Abhängigkeit der eindeutigen Produktnummer P_v berechnet. Das Bild 8-6 zeigt, dass sich näherungsweise bis zur Produktnummer $P_v = 200$ die Antwortzeit des FCFS für alle Bestellraten identisch verhält. Für alle größeren Produktnummern zeigt das FCFS-Verfahren einen annähernd linearen Anstieg bzw. Abfall in der Antwortzeit für unterschiedliche λ_B . Ein ansteigender Verlauf bedeutet, dass es innerhalb der Zellen für die Wachsabfüllung mit den größten Bearbeitungszeiten (Σ_2 , Σ_3 und Σ_4) zu einer Überlastung kommt. Dies führt zu Blockaden der FZ und zu einer stetig steigenden globalen Warteschlange. Das Verhalten ist für alle Bestellraten $\lambda_B \geq 47 \frac{\text{Best.}}{10^3 \text{ s}}$ zu beobachten. Für Bestellraten $\lambda_B < 47 \frac{\text{Best.}}{10^3 \text{ s}}$ ist hingegen ein näherungsweise linearen Abfall bzw. konstanter Verlauf der Antwortzeit nach der Kerze $P_v = 200$ zu erkennen. Dieses Verhalten zeigt, dass die zellenbasierte Fertigung mit der Planung durch das FCFS-Verfahren in der Lage ist, alle zufällig generierten Kerzenaufträge abzuarbeiten ohne dass es zu erheblichen Blockaden der Wachsabfüllzellen (Σ_2 , Σ_3 und Σ_4) bzw. der FZ 1 kommt.

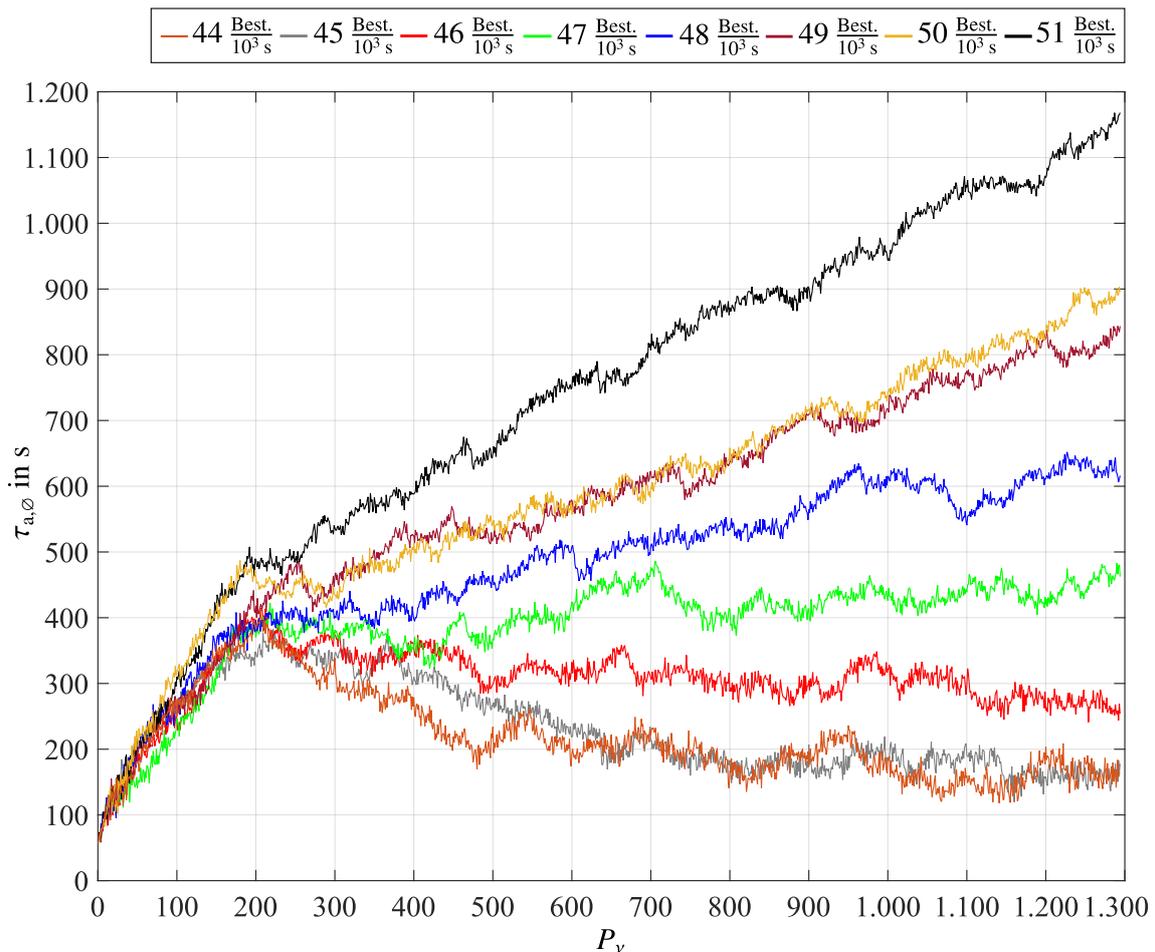


Bild 8-6: Verlauf der durchschnittlichen Antwortzeit in Abhängigkeit der Produktnummer und variierenden Bestelraten für das FCFS-Verfahren

Basierend auf den Ergebnissen dieser Voruntersuchung wird für die nachfolgenden Simulationsstudien für die in Bild 7-2 gezeigte Zellentopologie der Kerzenfertigung eine Bestelrate von $\lambda_B = 46 \frac{\text{Best.}}{10^3 \text{ s}}$ gewählt. Diese stellt einen guten Kompromiss zwischen Auslastung der Fertigung insbesondere der Wachsabfüllmaschinen und der Verhinderung von Blockaden der Maschinen bzw. Staus in Warteschlangen sowie Puffern von Kerzenbestellungen dar. Somit befinden sich die Maschinen mit der größten Bearbeitungszeit nicht im Betriebszustand Leerlauf und verrichten annähernd kontinuierlich wertschöpfende Tätigkeiten. Abhängig von der ermittelten Bestelrate ergibt sich die maximale Ankunftszeit eines zu fertigenden Loses. Für die Fertigung von 46 Bestellungen beträgt $t_{0,\text{max}} = 1.000 \text{ s}$. Bei 92 Kundenbestellung ergibt sich eine maximale Ankunftszeit von 2.000 s. Somit lassen sich beliebige Erhöhungen der Kerzenmengen realisieren.

Auf Basis der beschriebenen Parametrisierung werden im Folgenden die Ergebnisse von zwei Simulationsstudien erläutert. Innerhalb dieser Studien wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte extHRRN / rtHRRN Schedulingverfahren mit dem SPN-, dem ursprünglichen HRRN- und einem FCFS-Verfahren verglichen. In Abschnitt 6.2 wurde bereits erwähnt, dass der SPN-Scheduler als Grundlage für die Entwicklung des HRRN-Verfahrens diente und somit auch die Vergleichsbasis für den neuentwickelten extHRRN / rtHRRN darstellt. Zudem wurde der denkbar einfachste und oft verwendete FCFS Scheduler als

Bezugsverfahren gewählt. Die Auswahlfunktion Λ_s der entsprechenden Planungsverfahren für den globalen und zellinternen Scheduler sind der Tabelle 6-1 zu entnehmen und wurden als benutzerdefinierte Funktion (vgl. Bild 6-5) in der Simulationsumgebung ausgetauscht. Bei der Simulationsstudie wird die maximale Ankunftszeit $t_{0,\max}$ von 1.000 sukzessive bis auf 26.000 s erhöht. Dies entspricht 26 Simulationspunkten, wobei die größte maximale Ankunftszeit circa 7,2 Stunden beträgt. Unter Berücksichtigung, dass alle Kerzen fertiggestellt werden sollen, ergibt sich eine maximale Simulationsdauer von 29.000 s, welche mit 8,05 Stunden in etwa einer Fertigungsschicht entspricht. Für jeden Simulationspunkt wurden gemäß der Tabelle 8-2 zehn zufällige Produktfolgen generiert und durch jedes der vier ausgewählten Schedulingverfahren **online** abgearbeitet. Dies entspricht insgesamt 260 durchgeführten Simulationen pro Auswahlverfahren. Durch die zufällige Variabilität des Produktgenerators und die durchgeführten Iterationen sowie sukzessive Erhöhung von $t_{0,\max}$ wird sichergestellt, dass keine Produktfolgen zu Gunsten eines bestimmten Schedulers generiert werden.

8.2.2 Dynamische Fertigungsplanung bei minimaler Produktvarianz

Diese Simulationsstudie untersucht die Performanz der in Abbildung 7-2 dargestellten Zellentopologie **ohne** den Kühlturm Σ_6 . Dieser ist für die Herstellung der in Tabelle 7-1 dargestellten Produktvarianz ΔP_v^A **nicht** erforderlich.

Analyse der zufällig generierten Kerzensequenz bei minimaler Varianz

Das Bild 8-7 zeigt die Verteilungen der Losgröße, der Priorität, des Ankunftszeitpunktes und der Kerzenvariante beispielhaft für Eine der 260 zufällig generierten Produktfolgen. Die Häufigkeit H in Abhängigkeit des Produktbedürfnisses P_v (siehe Tabelle 7-1 für Erläuterung der Nummerierung) und der Priorität ρ zeigt das Bild 8-7 a). Im Bild 8-7 b) ist die Häufigkeit unter Berücksichtigung der Losgröße L_B und Priorität ρ dargestellt. Das Histogramm in 8-7 c) zeigt die Häufigkeit der zufällig generierten Ankunftszeitpunkte t_0 bis zum maximalen Wert $t_{0,max} = 18.000$ s in einer Quantisierung von 100 s.

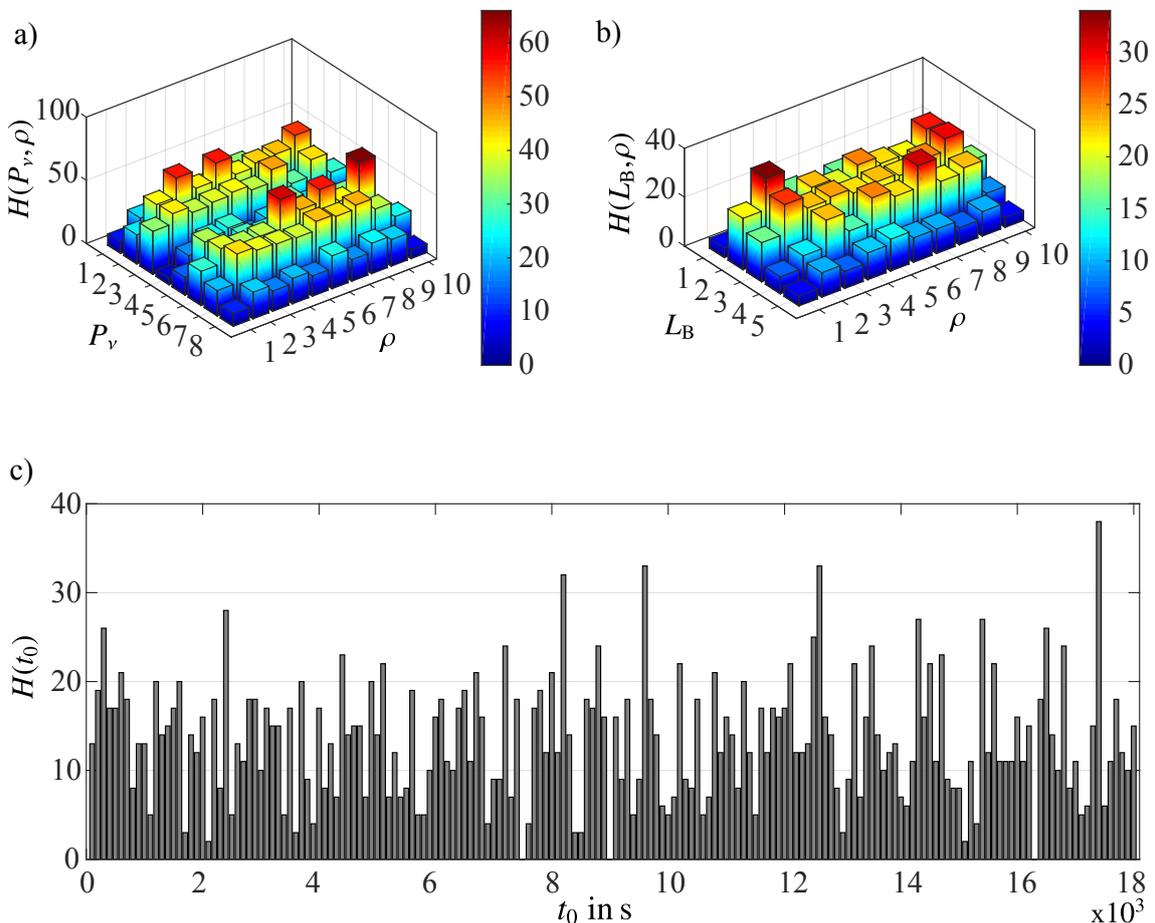


Bild 8-7: Häufigkeiten der zufällig generierten Bestellungen mit insgesamt 2436 Kerzen: a) $H(P_v, \rho)$, b) $H(L_B, \rho)$ und c) $H(t_0)$.

Die dargestellte generierte Folge an Kerzenbestellungen dient als Eingangsgröße für die nachfolgend durchgeführten Simulationen. Hierbei erhält **jeder** der vier Scheduler **immer** dieselbe Produktverteilung und nimmt die Onlineplanung der zellenbasierten Fertigung vor, bis alle Kerzen produziert wurden.

Fertigungsablauf bei minimaler Varianz

Für die Fertigung der Produktvarianz ΔP_v^A sind die FZs Σ_1 und Σ_5 zwingend erforderlich. Des Weiteren wird für die Wachsabfüllung eine der drei Zellen FZ 2, FZ 3 oder FZ 4 benötigt. Der Fertigungsablauf ist beispielhaft in Bild 8-8 für eine kleine weiße Kerze P_{73} aus der in Bild 8-7 gezeigten Produktverteilung für vier unterschiedliche Scheduler dargestellt.

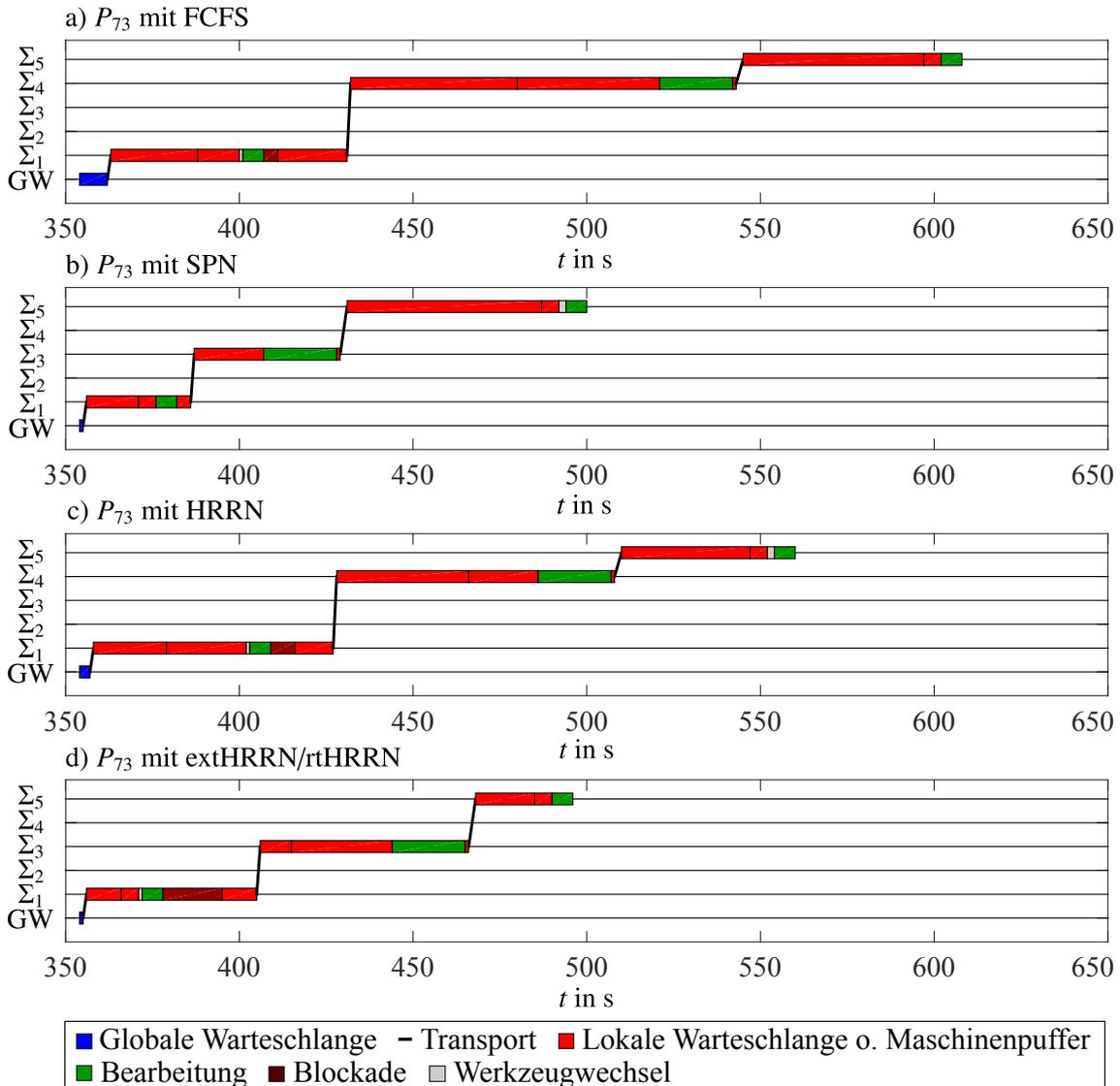


Bild 8-8: Fertigungsablauf einer kleinen weißen Kerze P_{73} für vier Scheduler: a) FCFS, b) SPN, c) HRRN und d) extHRRN/rtHRRN

Für die Fertigung einer kleinen weißen Kerze wird das Produkt P_{73} nach dem Aufenthalt in der GW der FZ Σ_1 zugewiesen. Im Anschluss erfolgt in Abhängigkeit der aktuellen Zellen- und Maschinenverfügbarkeit und des Auswahlverfahrens die Abfüllung des Paraffins in der FZ Σ_3 und Σ_4 . Final erfolgt das Beschriften, Bedeckeln und Verpacken in FZ Σ_5 . Für die Fertigung der Kerze P_{73} benötigt der FCFS insgesamt eine Antwortzeit von $\tau_a = 254$ s. Im Falle des SPN ergeben sich 146 s. Beim HRRN sind es 206 s und für den extHRRN/rtHRRN 142 s. Dieser Vergleich zeigt **nur** den Fertigungsablauf im Falle einer

Kerze P_{73} und liefert **keinesfalls** eine belastbare Aussage hinsichtlich der Performanz der unterschiedlichen Verfahren. Dies zeigt der folgende Fertigungsablauf einer großen roten Kerze P_{77} aus der in Bild 8-7 dargestellten Produktverteilung, welcher in Bild 8-9 dargestellt ist.

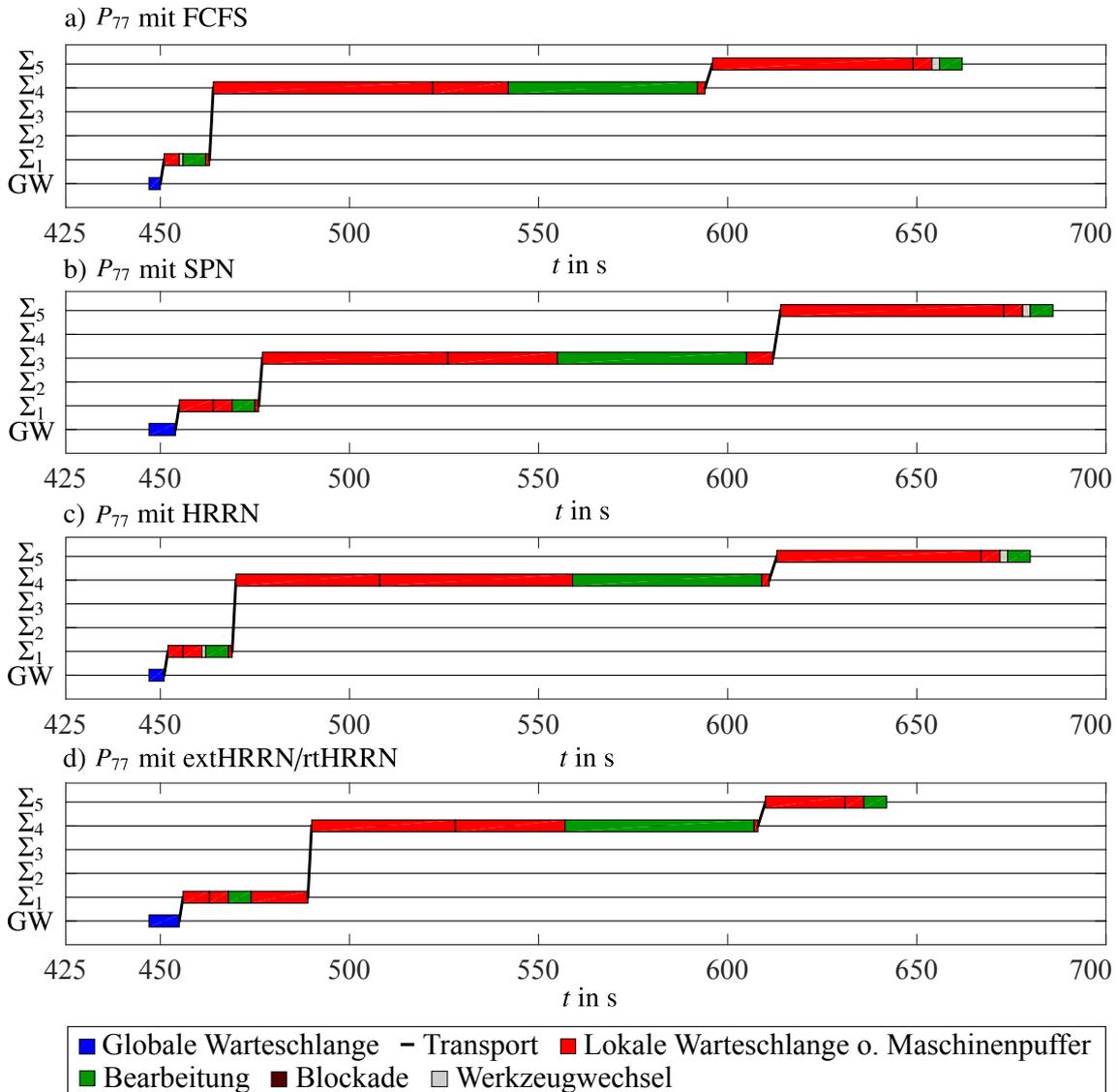


Bild 8-9: Fertigungsablauf einer großen roten Kerze P_{77} für vier Scheduler: a) FCFS, b) SPN, c) HRRN und d) extHRRN/rtHRRN

Für die Kerze P_{77} ergeben sich die Antwortzeiten beim FCFS zu 215 s, beim SPN sind es 239 s, der HRRN benötigt 233 s zur Fertigung der Kerze und beim extHRRN/rtHRRN verlässt die Kerze nach 195 s die FZ Σ_5 . Während beim Produkt P_{73} der FCFS (vgl. Bild 8-8 a) die größte Antwortzeit aufweist, ist es bei der Kerze P_{77} der SPN (vgl. Bild 8-9 c). Zudem liegt beim FCFS für das Produkt P_{77} eine geringere Antwortzeit als beim HRRN vor, welches ebenfalls unterschiedlich zur Kerze P_{73} ist. Die Kombination aus extHRRN/rtHRRN zeigt in diesem Fall ebenfalls die geringste Durchlaufzeit. Um eine Aussage der unterschiedlichen Verfahren hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zu erhalten, werden im Folgenden Simulationsstudien durchgeführt und ausgewertet. Die Analyse erfolgt auf Basis

der gemittelten Antwortzeit, der Standardabweichungen von einzelnen produktspezifischen Antwortzeiten, des Beschleunigungsmaßes und der Werkzeugwechsel.

Untersuchung der mittleren Antwortzeit bei minimaler Varianz

Ein wichtiges Kriterium zur Bewertung der Performanz eines Schedulingverfahrens ist die in Gleichung (6-1) definierte mittlere Antwortzeit $\bar{\tau}_a$, die auf Basis aller Antwortzeiten für eine gegebene generierte Kerzenfolge nach Abschluss der erfolgreichen Simulation berechnet wird.

Das Bild 8-10 zeigt für insgesamt 1.040 durchgeführte Simulationen die mittlere Antwortzeit $\bar{\tau}_a$ in Abhängigkeit der steigenden maximalen Ankunftszeit $t_{0,\max}$ in Form eines Kastendiagramms²⁴ (engl. *boxplot*).

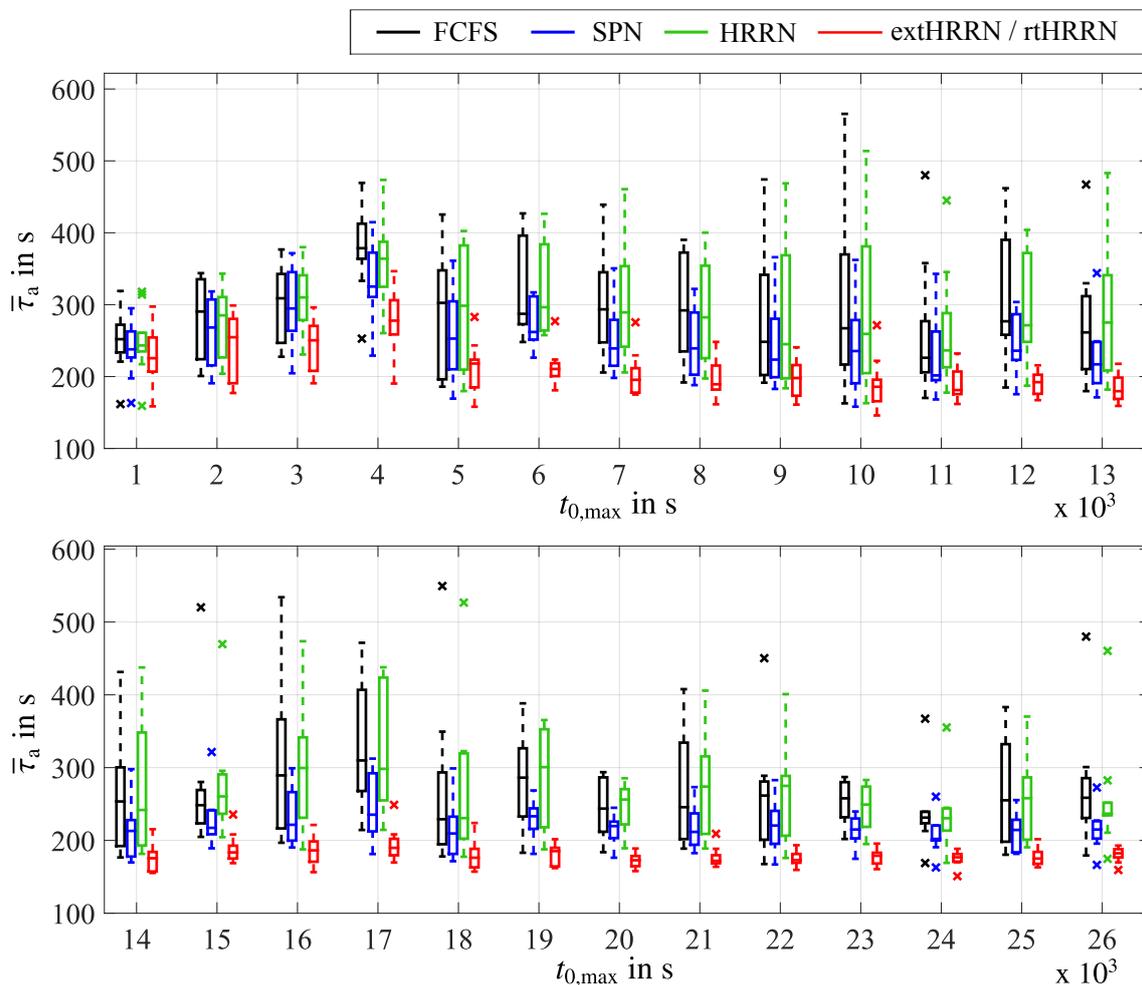


Bild 8-10: Kastendiagramm der mittleren Antwortzeit in Abhängigkeit der ansteigenden maximalen Ankunftszeit für vier Schedulingverfahren mit minimaler Produktvarianz

²⁴Im Kasten ist der Median, das 25 % Quartil (unteres Ende des Kastens), das 75 % Quartil (oberes Ende des Kastens) sowie der Minimal- und Maximalwert dargestellt.

Aus dem Kastendiagramm geht hervor, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Planungsverfahren mit der Kombination aus extHRRN und rtHRRN über den gesamten Simulationsbereich tendenziell die geringsten mittleren Antwortzeiten aufweist. Auch die Streuung von $\bar{\tau}_a$ beim extHRRN / rtHRRN ist im Vergleich zu den anderen Schedulingern am geringsten, abgesehen von den einzelnen Ausreißern, die auf ungünstige Kerzenfolgen zurückzuführen sind. Das SPN-Verfahren weist tendenziell ebenfalls geringe mittlere Antwortzeiten auf, allerdings ist die Streuung deutlich größer im Vergleich zum extHRRN / rtHRRN. Zum Teil wesentlich größere und streuende mittlere Antwortzeiten entstehen bei der Planung mit dem FCFS- sowie dem klassischen HRRN-Verfahren. Eine ähnliche Tendenz ist in Bild 8-11 zu erkennen, bei der die mittlere Antwortzeit für jede der 260 durchgeführten Simulationen pro Scheduler und ihr durchschnittlicher Trend dargestellt sind.

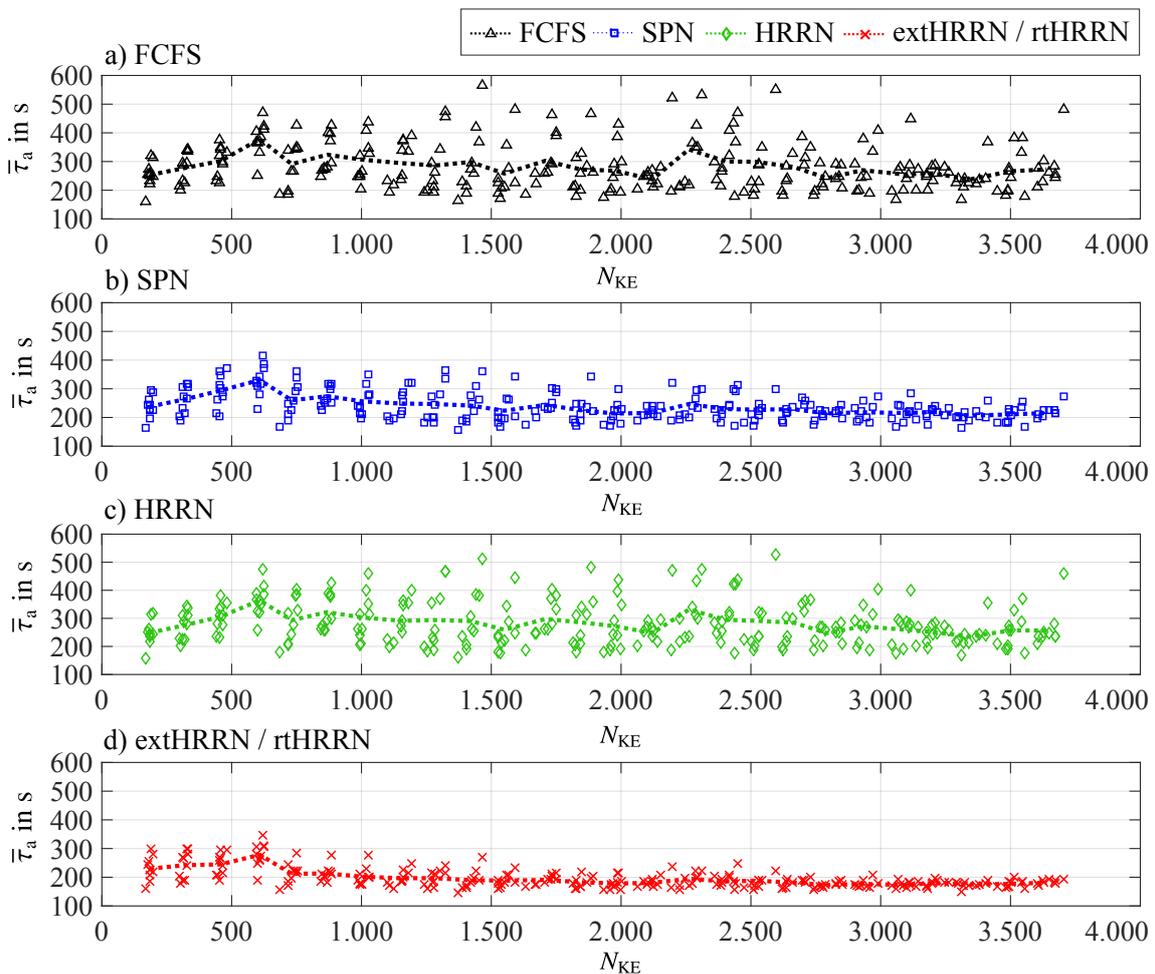


Bild 8-11: Mittlere Antwortzeit aller durchgeführten Simulationen und die durchschnittlichen Trends in Abhängigkeit der Kerzenanzahl N_{KE} für a) FCFS, b) SPN, c) HRRN und d) extHRRN / rtHRRN

Direkt proportional zur ansteigenden maximalen Ankunftszeit ist bei konstanter Bestellrate von 46 Bestellungen pro 1.000 s die Menge der zu fertigenden Kerzen, die über die zufällige Losgröße ebenfalls variiert. Für die nachfolgende Analyse, welche in Bild 8-12 dargestellt ist, wurde auf Basis der zehn durchgeführten Simulationen für jede maximale

Ankunftszeit eine mittlere Kerzenanzahl und die mittlere Antwortzeit berechnet. Dies entspricht dem, in Bild 8-11 dargestellten durchschnittlichen Trend, jedes Verfahrens. Zudem wurde der Mittelwert der Standardabweichungen nach Gleichung (6-3) berechnet und über die steigende Kerzenmenge aufgetragen. Des Weiteren wurde das Beschleunigungsmaß α_{FCFS} für den extHRRN / rtHRRN, SPN und HRRN im Bezug zum FCFS ermittelt.

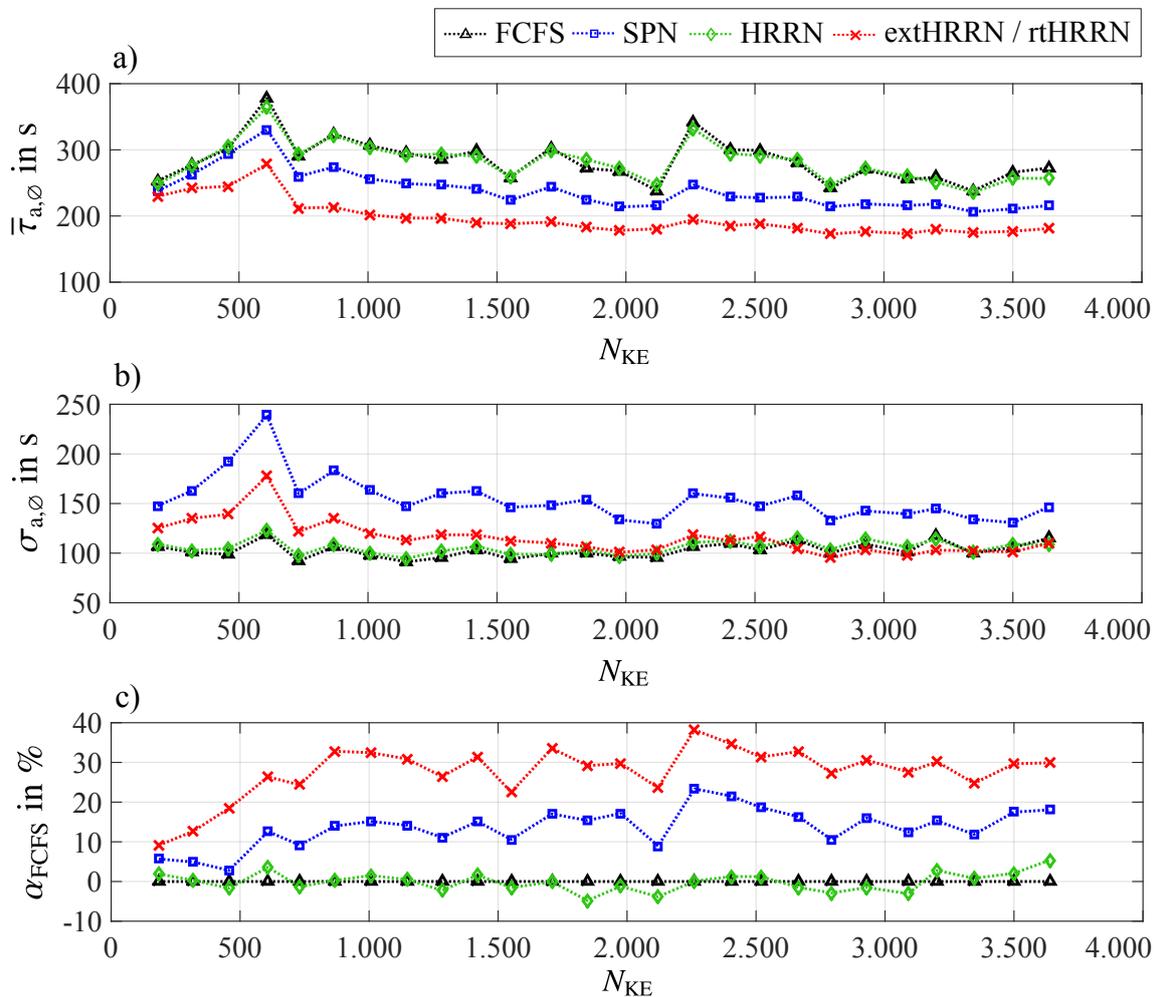


Bild 8-12: Durchschnittliche mittlere Antwortzeit a), durchschnittliche Standardabweichung der Antwortzeit b) und Beschleunigungsmaß im Bezug zum FCFS c) für steigende Kerzenmengen bei minimaler Produktvarianz

Beim Verlauf der mittleren Antwortzeit in 8-12 a) zeigt sich analog zur Auswertung im zuvor gezeigten Kastendiagramm, dass der extHRRN / rtHRRN Scheduler die geringste mittlere Antwortzeit aufweist. Das SPN-Verfahren befindet sich im Mittelfeld der Betrachtungen, wohingegen der FCFS- und der HRRN-Scheduler eine nahezu identische Performanz aufweisen. Im Verlauf der Standardabweichung (siehe Bild 8-12 b) ist deutlich zu erkennen, dass das SPN- und das extHRRN / rtHRRN die größten Streuungen verursacht. Beim SPN werden die Produkte nach steigender verbleibender Arbeitszeit sortiert. Dies führt dazu, dass Kerzen mit einer großen Bearbeitungszeit bspw. aufgrund der Variante zunehmend in der Warteschlange nach hinten verschoben werden. Dadurch vergrößert sich die Streuung, weil Produkte mit einer geringen Bearbeitungszeit bevorzugt werden. Dies ist ein erstes Anzeichen des Verhungern von Produkten, welches allerdings

nicht auftreten kann, weil immer endliche Bestellsequenzen produziert werden und eine begrenzte Warteschlangenkapazität zur Verfügung steht. Dieses Verhalten ist ebenfalls im Kastendiagramm 8-13 der Standardabweichung aller produktspezifischen Antwortzeiten zu beobachten, die auf Basis aller Produkte für die jeweilige Simulation berechnet wurde.

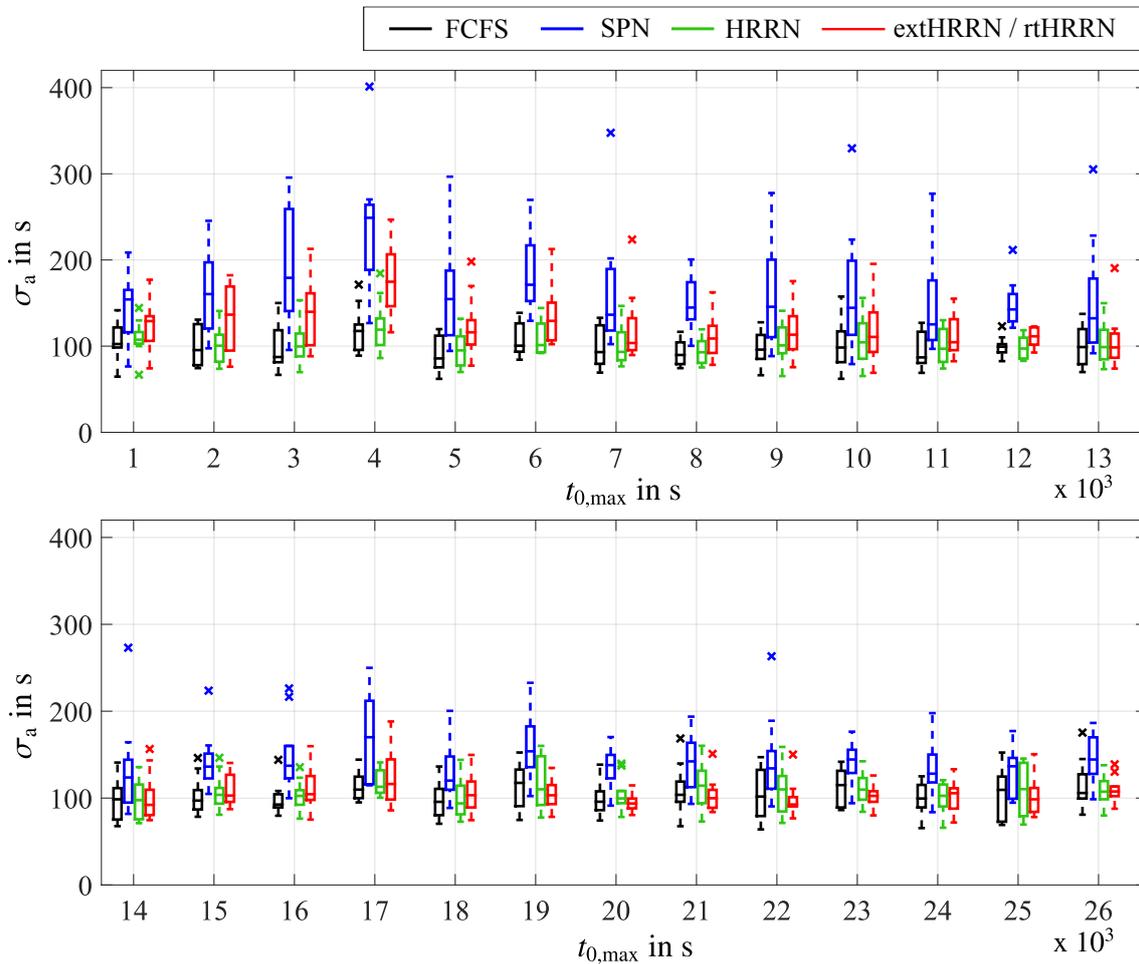


Bild 8-13: Kastendiagramm der Standardabweichung aller Antwortzeiten in Abhängigkeit der ansteigenden maximalen Ankunftszeit für vier Schedulingverfahren bei minimaler Produktvarianz

Das extHRRN / rtHRRN-Verfahren hat im Bereich $1.000 \text{ s} < t_{0,max} \leq 18.000 \text{ s}$ eine größere Streuung im Vergleich zum FCFS bzw. HRRN, weil über die produktindividuelle Priorität und die berücksichtigten Werkzeugwechsel eine dynamische Umsortierung der Warteschlangen erfolgt, die sich suboptimal auf das eigentliche Scheduling auswirken. Dies geht ebenfalls aus dem Bild 8-12 b) für den Bereich $200 < N_{KE} \leq 2.500$ hervor. Hierdurch können bspw. Produkte infolge ihrer höheren Priorität bevorzugt werden, obwohl Sie eine hohe Bearbeitungszeit erfordern. Der FCFS- und HRRN-Scheduler zeigen die geringste Streuung, aufgrund der nicht vorhandenen bzw. wesentlich geringeren Änderung der Produktionsreihenfolge. Das Bild 8-12 c) zeigt die prozentuale Verbesser- bzw. Verschlechterung des extHRRN / rtHRRN-, SPN- und HRRN-Schedulers in Bezug auf den FCFS. Im Falle des extHRRN / rtHRRN liegt die minimale Verbesserung bei 9,1 % und die Maximale 38,2 %. Bei SPN schwankt die Verbesserung zwischen 2,8 % und 23,4 %. Der klassische HRRN hat eine Verschlechterung von -4,8 % und eine maximale Verbesserung von 5,3 %.

Neben der mittleren Antwortzeit, der Standardabweichung und dem Beschleunigungsmaß sind die in der Kerzenfertigung entstehenden Werkzeugwechsel von besonderem Interesse, weil diese keine wertschöpfende Tätigkeit darstellen.

Untersuchung der entstandenen Werkzeugwechsel bei minimaler Varianz

Im Folgenden wird die Auswirkung der durch die FZ 1 und FZ 5 verursachten Werkzeugwechsel in Abhängigkeit der steigenden Mengen an Kerzen untersucht. Auf Basis der 260 für jeden Scheduler durchgeführten Simulationen wird ebenfalls eine mittlere Produktmenge und eine durchschnittliche Anzahl an Werkzeugwechseln für jeden Quantisierungsschritt der maximalen Ankunftszeit berechnet. Das Bild 8-14 a) zeigt die durchschnittliche absolute Anzahl an Werkzeugwechseln in Abhängigkeit der Produktzahl.

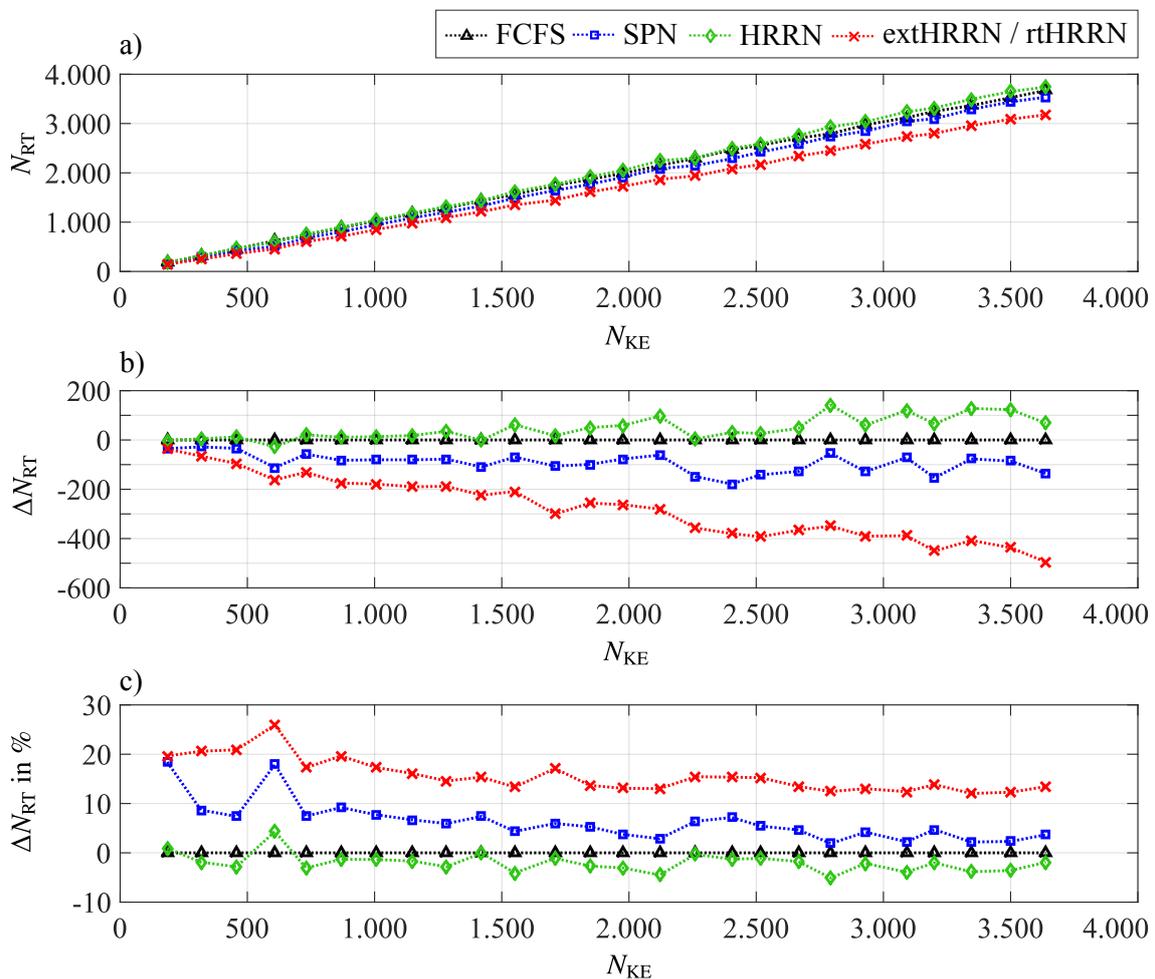


Bild 8-14: Tendenz der Werkzeugwechsel bei minimaler Kerzenvarianz in Abhängigkeit der Kerzenanzahl: a) absolute Werkzeugwechselanzahl, b) Differenz im Bezug zum FCFS und c) relative Anzahl an Werkzeugwechsel im Bezug zum FCFS.

Deutlich zu erkennen ist der annähernd lineare Anstieg der Werkzeugwechselanzahl mit einer zunehmenden Anzahl an Kerzen. Hierbei weist der extHRRN / rtHRRN die niedrigste Steigung und somit auch die geringste Werkzeugwechselanzahl N_{RT} auf.

Dies geht auch aus der Differenzbetrachtung im Bild 8-14 b) im Bezug auf den FCFS hervor. Der SPN-Scheduler liegt bei der Einsparung wiederum zwischen dem extHRRN / rtHRRN und dem FCFS bzw. HRRN.

Prozentual betrachtet spart das extHRRN / rtHRRN-Verfahren minimal 12 % und maximal 26 %. Im Falle des SPN schwankt die Einsparung zwischen 4,3 % und 19,6 %. Der klassische HRRN verursacht tendenziell eher mehr Werkzeugwechsel als der FCFS-Scheduler.

Zwischenfazit der Simulationsstudie bei minimaler Produktvarianz

Zusammenfassend zeigen der FCFS und HRRN im Mittel betrachtet tendenziell die höchsten mittleren Antwortzeiten bei annähernd identischen Trendverläufen. Dies gilt größtenteils auch für die Betrachtung im Kastendiagramm für die mittlere Antwortzeit, die Standardabweichung der Antwortzeiten und bei der Betrachtung der erforderlichen Werkzeugwechsel. Der SPN ist dem FCFS bzw. dem HRRN im Bezug auf die mittlere Antwortzeit und die eingesparten Werkzeugwechsel überlegen, allerdings kommt es zu einer höheren Streuung der Antwortzeiten, weil Kerzen mit einer geringen Bearbeitungszeit bevorzugt werden. Dieser Effekt ist ein Anzeichen für das Verhungern von Kerzenaufträgen.

Im Vergleich zu den anderen Verfahren zeigt der extHRRN / rtHRRN Scheduler die geringste durchschnittliche mittlere Antwortzeit und spart die meisten Werkzeugwechsel ein. Der Verlauf der durchschnittlichen Standardabweichung der Antwortzeiten und die Betrachtung im Kastendiagramm zeigen eine Annäherung des Streuverhaltens an den FCFS bzw. HRRN Scheduler für die Kerzenanzahl $N_{KE} > 1.500$ oder $t_{0,max} > 12.000$ s.

8.2.3 Dynamische Fertigungsplanung bei maximaler Produktvarianz

Im Vergleich zur vorherigen Studie wird in diesem Abschnitt die Planungsperformanz für die Produktvarianzen ΔP_v^A und ΔP_v^B untersucht. Zur Herstellung der insgesamt 32 möglichen Kerzenvarianten (vgl. Tabelle 7-1) wird in diesem Fall zusätzlich der Kühlturm FZ 6 gemäß dem Bild 7-2 benötigt.

Analyse der zufällig generierten Kerzensequenz bei maximaler Varianz

Analog zur vorherigen Studie im Abschnitt 8.2.2 zeigt das Bild 8-15 ebenfalls die Häufigkeiten einer generierten Kerzensequenz in Abhängigkeit der Losgröße L_B , der Priorität ρ , der Ankunftszeit t_0 und dem Produktbedürfnis P_v .

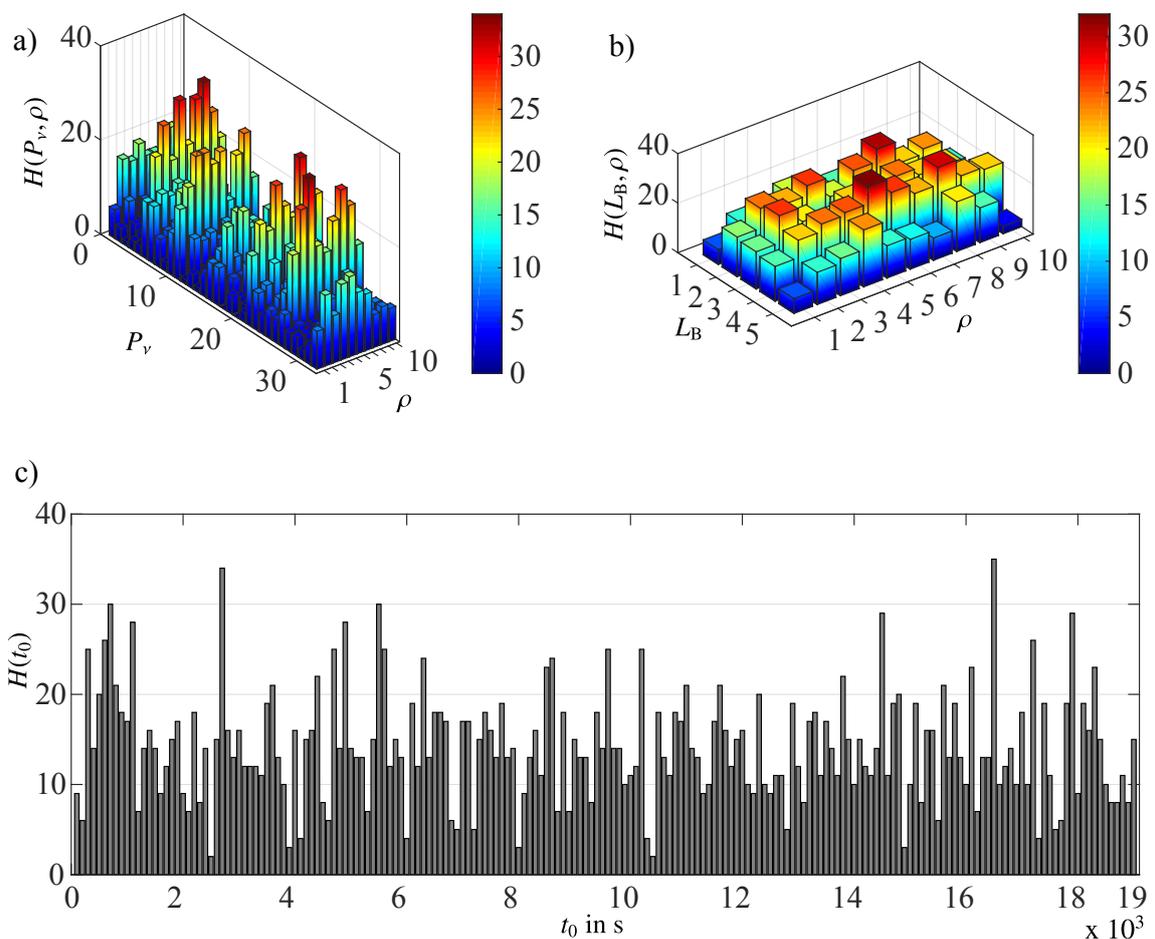


Bild 8-15: Häufigkeiten der zufällig generierten Bestellungen mit insgesamt 2717 Kerzen: a) $H(P_v, \rho)$, b) $H(L_B, \rho)$ und c) $H(t_0)$.

Im Gegensatz zum Bild 8-7 a) sind im Bild 8-15 a) nun 32 Produktbedürfnisse aufgetragen anstatt acht. Alle anderen Einstellungen im Produktgenerator werden nicht verändert.

Neben der Änderung im Produktgenerator wird im Folgenden der Fertigungsablauf mit Rückführung für die zweifarbigen Kerzen erläutert.

Fertigungsablauf mit Rückführung bei maximaler Varianz

Zur Fertigung der Produktvarianz ΔP_v^B wird zunächst die untere Hälfte der Glaskerze in einer der FZs Σ_2 , Σ_3 oder Σ_4 befüllt. Anschließend muss das flüssige eingefärbte Paraffin im Kühlturm Σ_6 unter Verwendung des FCFS-Verfahren als ZS für Fünf bzw. Zehn Minuten abgekühlt werden. Im Anschluss müssen die halb fertigen Kerzen zur zweiten Abfüllung durch den GS auf die FZ 2, FZ 3 oder FZ 4 zugewiesen werden.

Dieser Ablauf ist beispielhaft für die kleine gelbrote Kerze P_{100} aus der in Bild 8-15 dargestellten Produktverteilung für alle vier Scheduler in Bild 8-16 dargestellt.

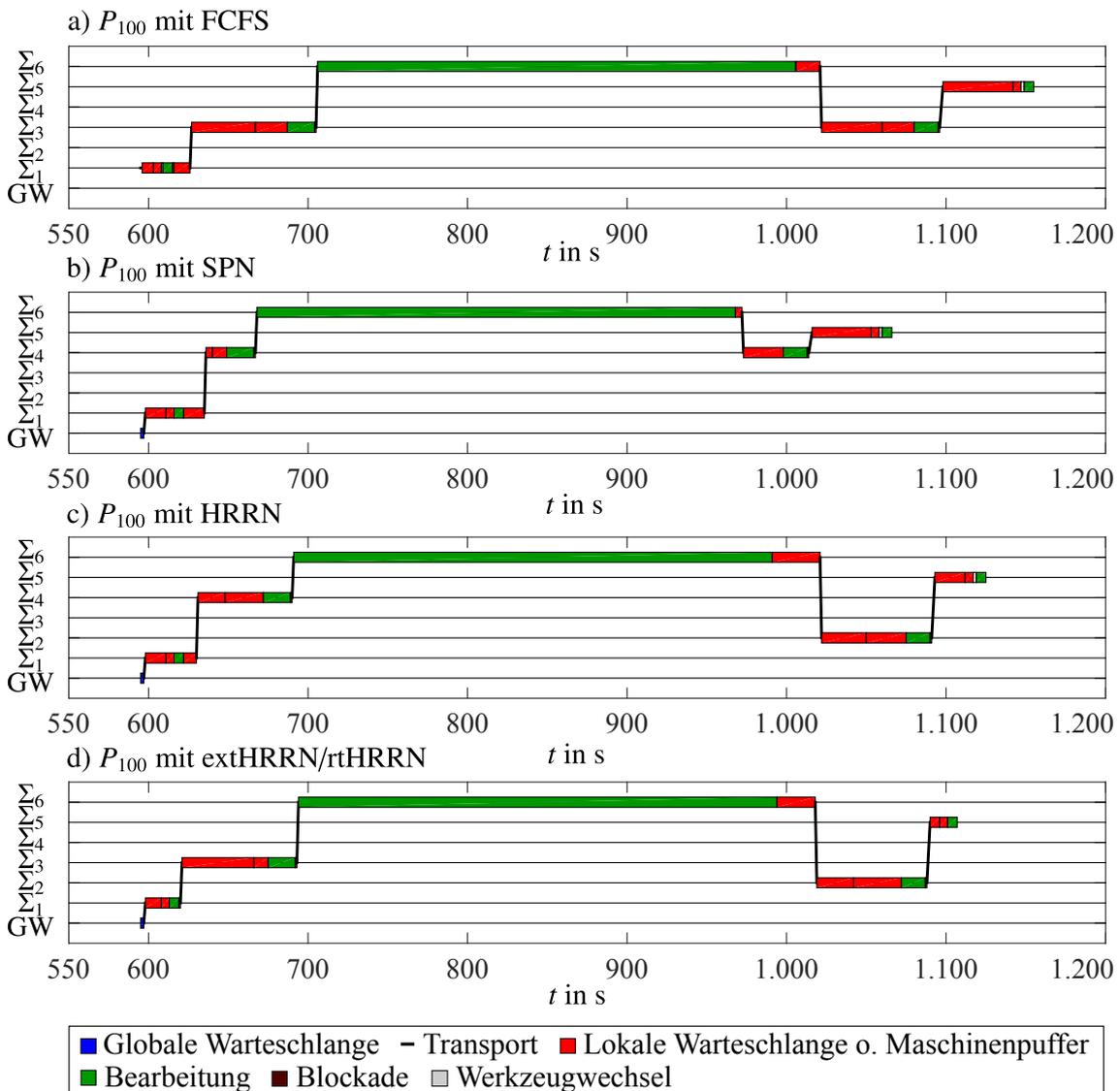


Bild 8-16: Fertigungsablauf einer kleinen gelbroten Kerze P_{100} für vier Scheduler: a) FCFS, b) SPN, c) HRRN und d) extHRRN/rtHRRN

Auffällig beim FCFS ist, dass das Produkt aufgrund einer leeren GW direkt auf die FZ Σ_1 zugewiesen wird und nach einer Antwortzeit von 560 s fertiggestellt ist. Zur Fertigung der Kerze P_{100} benötigt der HRRN 530 s und der extHRRN/rtHRRN 512 s. Die geringste Antwortzeit von 471 s zur Herstellung der gelbroten Kerze hat der SPN. Beim HRRN

und extHRRN/ rtHRRN ist zudem deutlich zu erkennen, dass die Erstabfüllung bzw. Einfärbung (Σ_1 bzw. Σ_3) in einer anderen Zelle durchgeführt wird, als die Zweitabfüllung (beide Σ_2) nach dem Abkühlen (Σ_6). Das Bild 8-17 zeigt beispielhaft den Fertigungsablauf einer großen zweifarbigen (weiß und grün) Kerze P_{2627} aus der in Bild 8-15 dargestellten Produktverteilung für vier unterschiedliche Planungsverfahren.

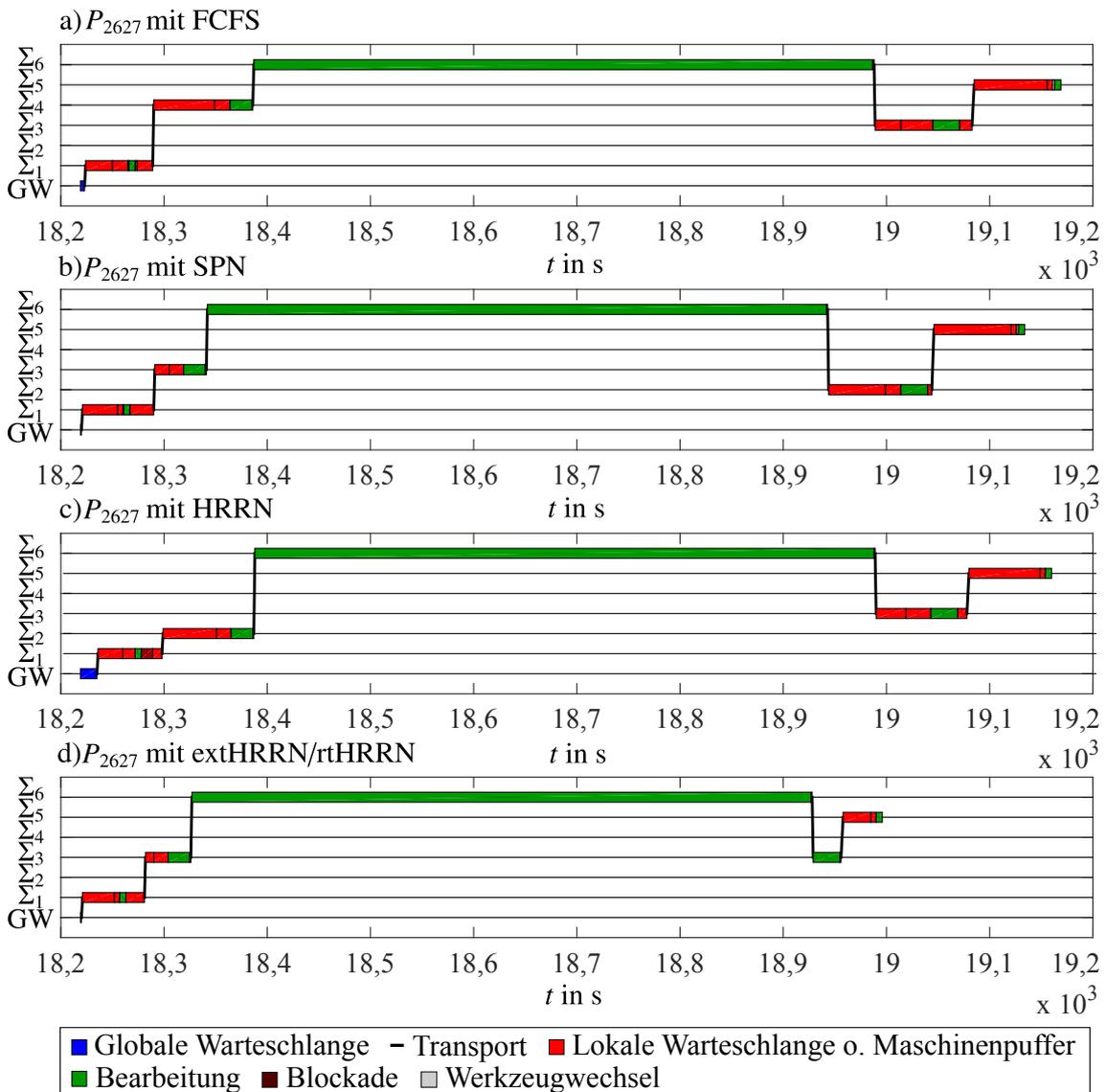


Bild 8-17: Fertigungsablauf einer großen zweifarbigen Kerze P_{2627} für vier Scheduler: a) FCFS, b) SPN, c) HRRN und d) extHRRN/rtHRRN

In diesem Fall weist der extHRRN/rtHRRN die geringste Antwortzeit mit 776 s auf, gefolgt vom SPN mit 915 s. Der HRRN benötigt für die Fertigung der Kerze P_{2627} eine Dauer von 941 s. Die höchste Antwortzeit für die große weißgrüne Kerze verursacht FCFS mit 950 s. Die Wartezeiten im Kühlturmausgangspuffer liegen bei den unterschiedlichen Planungsverfahren im Bereich zwischen einer und zwei Sekunden und sind aufgrund der Achsenskalierung nicht zu erkennen. Analog zur Betrachtung des Fertigungsverlaufes für die Kerzen bei minimaler Produktvarianz zeigt sich bei der maximaler Varianz ebenfalls, dass für eine Aussage bzgl. der Performanz von den Scheduling-Verfahren sich die Betrachtung

tung einzelner Produkte nicht eignet. Deshalb wird gleichermaßen eine Simulationsstudie mit sukzessiver Erhöhung der maximalen Ankunftszeit durchgeführt.

Untersuchung der mittleren Antwortzeit bei maximaler Varianz

Analog zum Vorgehen bei der minimalen Produktvarianz wurden ebenfalls insgesamt 260 Simulationen pro Scheduler mit steigender maximaler Ankunftszeit durchgeführt. Das Bild 8-18 zeigt das Kastendiagramm der mittleren Antwortzeit in Abhängigkeit der steigenden maximalen Ankunftszeit $t_{0,max}$.

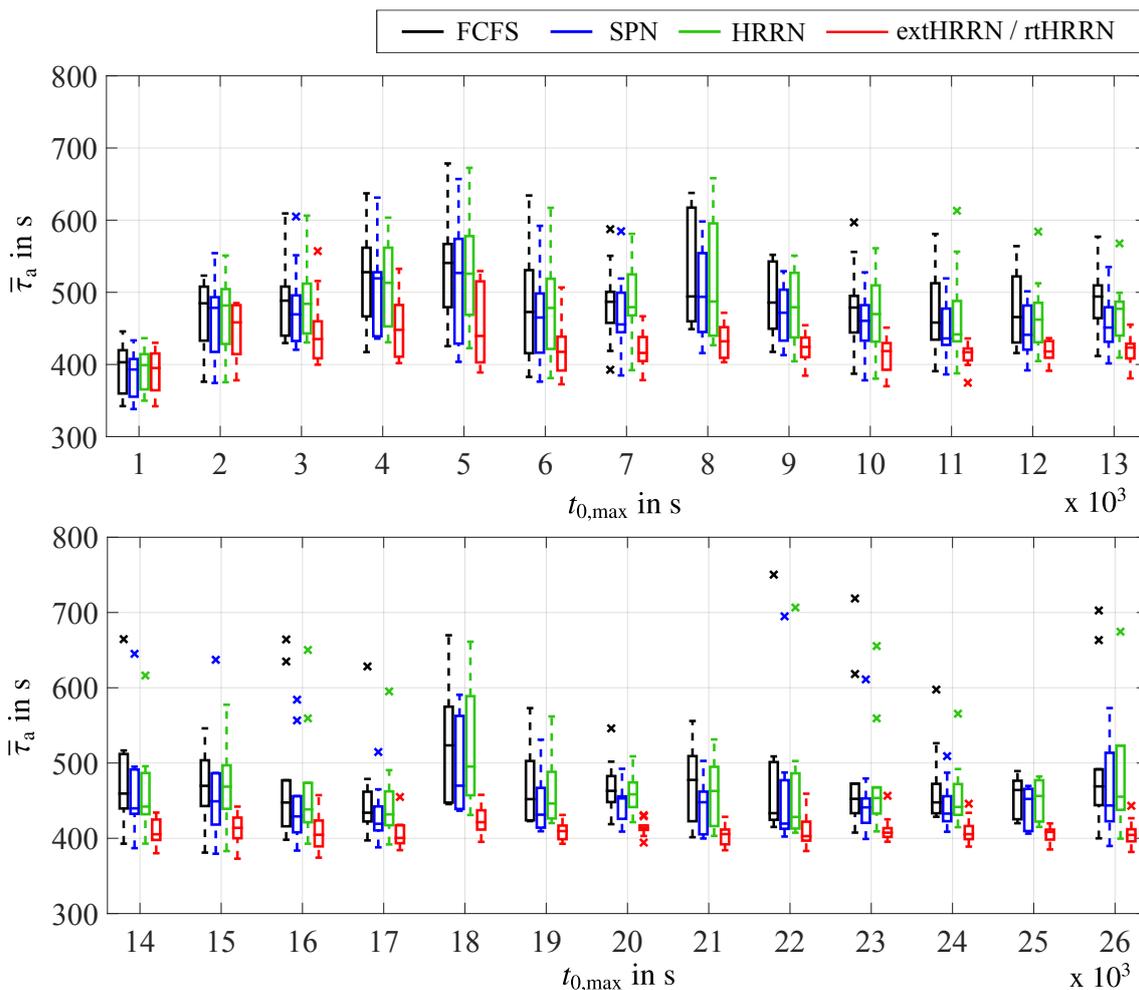


Bild 8-18: Kastendiagramm der mittleren Antwortzeit in Abhängigkeit der ansteigenden maximalen Ankunftszeit für vier Schedulingverfahren mit maximaler Produktvarianz

Im Vergleich zu den Untersuchungen der mittleren Antwortzeit im Abschnitt 8.2.2 (vgl. Bild 8-10) ist ersichtlich, dass der gesamte Verlauf im Kastendiagramm um etwa 200 s angehoben wird. Dies ist auf durch ΔP_v^B gestiegene Fertigungskomplexität zurückzuführen. Zweifarbige Kerzen müssen den Abfüllprozess (FZ 2, FZ 3 und FZ 4) zweimal durchlaufen und werden durch die FZ 6 mit einem Fassungsvermögen von bis zu 200 Kerzen für eine Dauer von mindestens 300 s und maximal 600 s abgekühlt.

Auch bei gesteigerter Variantenvielfalt der Kerzen und der damit einhergehenden höheren Prozesskomplexität zeigt der extHRRN / rtHRRN die geringsten mittleren Antwortzeiten bzw. Streuungen. Tendenziell betrachtet, hat sich die Performanz des SPN-Verfahrens dem FCFS bzw. dem HRRN angenähert. Dies ist ebenfalls bei der Betrachtung der mittleren Antwortzeit für alle durchgeführten Simulationen und dessen durchschnittlichem Trend in Bild 8-19 zu erkennen.

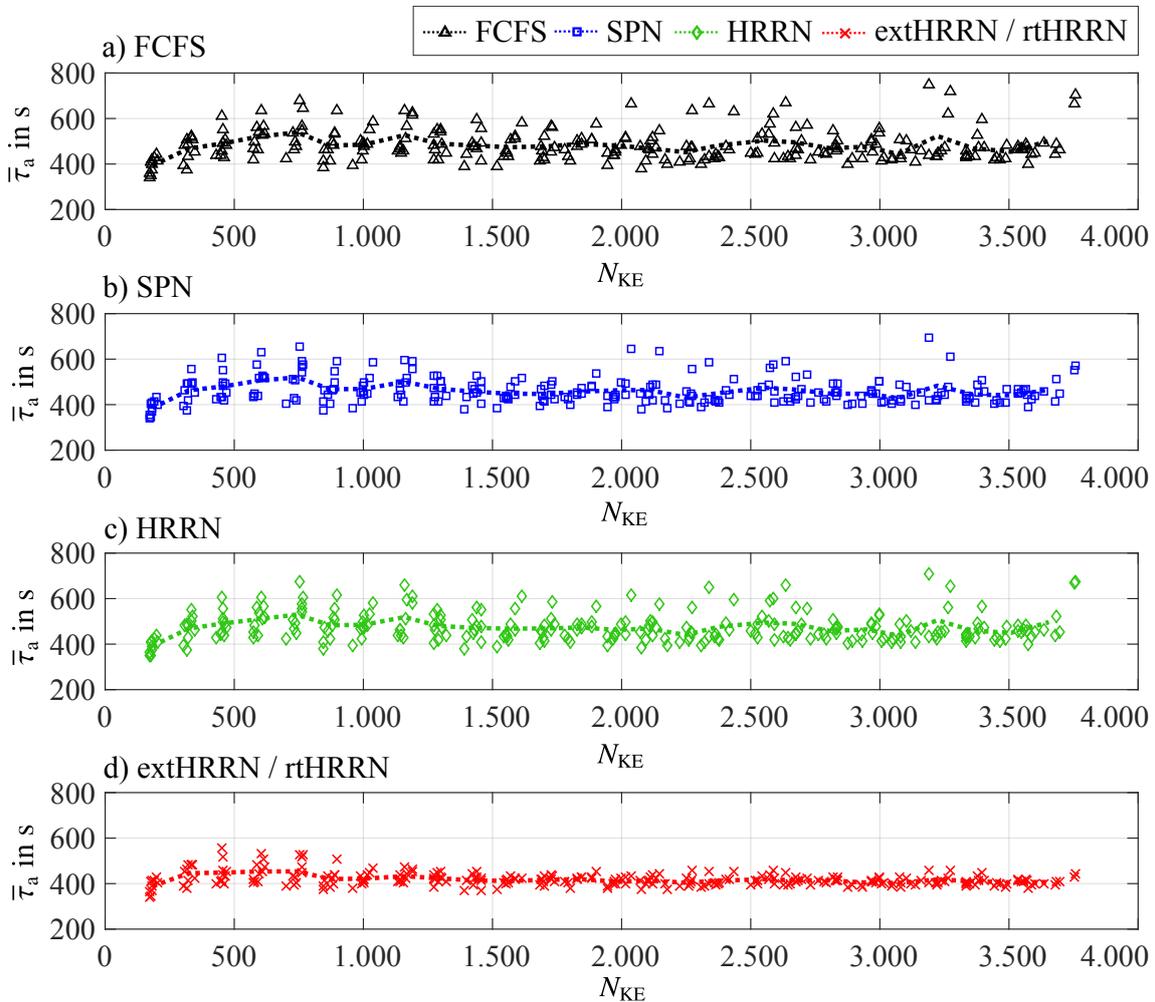


Bild 8-19: Mittlere Antwortzeit aller durchgeführten Simulationen und deren durchschnittlicher Trend in Abhängigkeit der Kerzenanzahl N_{KE} für a) FCFS, b) SPN, c) HRRN und d) extHRRN / rtHRRN

Für die nachfolgende Analyse wird wiederum der über zehn Simulationen berechneten Mittelwerte in Abhängigkeit der zu fertigenden Kerzenmenge betrachtet (vgl. Abschnitt 8.2.2), welches ebenfalls dem durchschnittlichen Trendverlauf aus Bild 8-19 jedes einzelnen Schedulers entspricht.

Das Bild 8-20 a) zeigt die mittlere Antwortzeit. Analog zur Darstellung in Bild 8-18 weist der extHRRN / rtHRRN die geringsten $\bar{\tau}_a$ in Abhängigkeit der Kerzenanzahl auf. Die durchschnittliche Streuung aller Antwortzeiten zeigt, dass nur der SPN-Scheduler sich vom Trend der anderen Verfahren unterscheidet. Während der FCFS, SPN und extHRRN / rtHRRN eine annähernd ähnliche Streuung aufweisen, treten beim SPN infolge des Verhungerns deutliche Ausreißer auf. Dies geht ebenfalls aus der in Bild 8-21 dargestellten Betrachtung der Standardabweichung in einem Kastendiagramm hervor. Die Ausreißer beim SPN liegen größtenteils zwischen dem 1,3– bis 2,5–fachen Wert des Medians.

Bei der Betrachtung des Beschleunigungsmaßes im Bild 8-20 c) zeigt der extHRRN / rtHRRN Scheduler tendenziell ebenfalls die größte Verbesserung die minimal 1,3 % und maximal 17,2 % beträgt. Das SPN-Verfahren zeigt hingegen mindestens 1,1 % und höchstens 6,6 % Beschleunigung im Vergleich zum FCFS. Der klassische HRRN hat eine maximale Beschleunigung von 3,7 %.

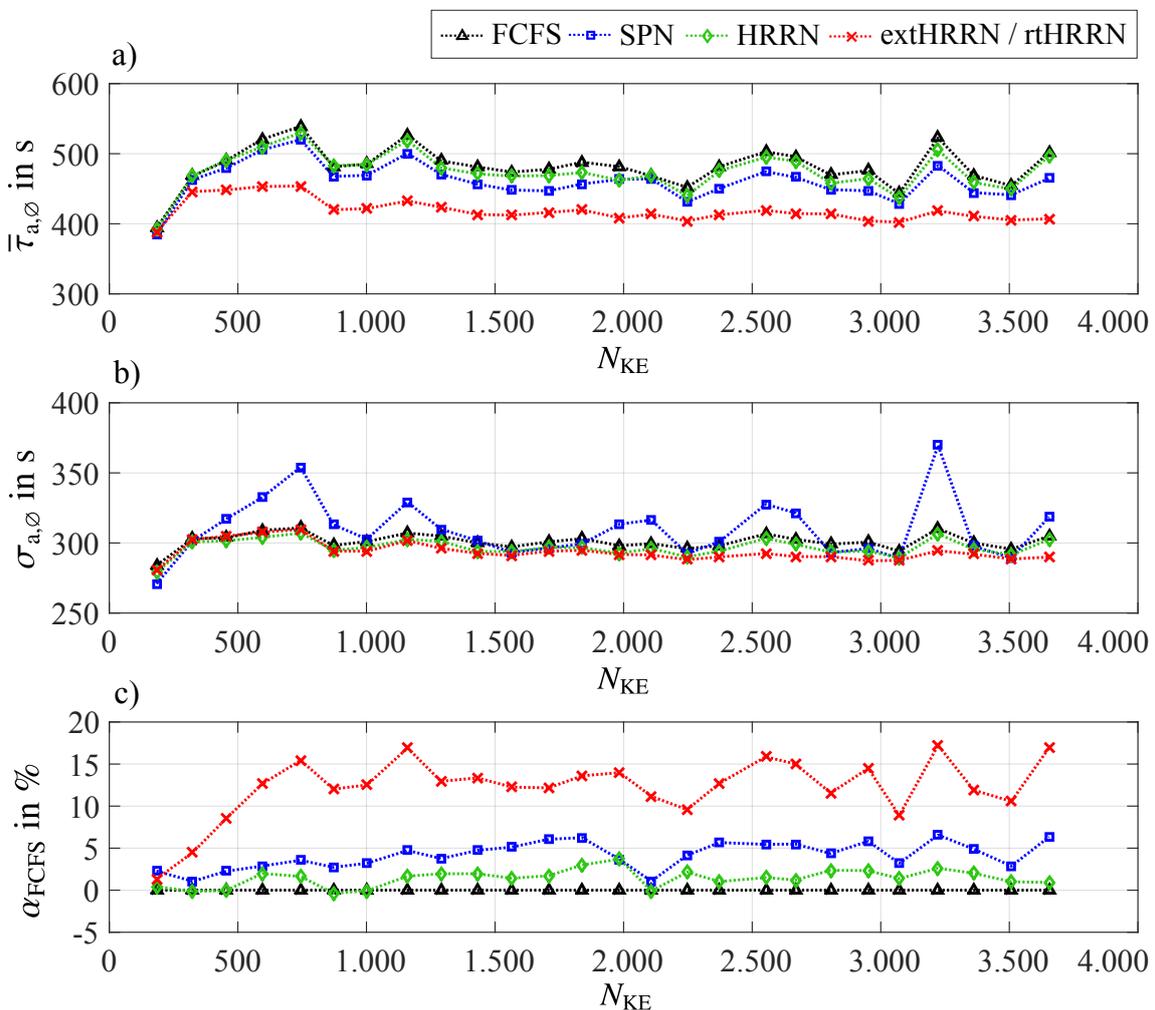


Bild 8-20: Durchschnittliche mittlere Antwortzeit a), durchschnittliche Standardabweichung der Antwortzeit b) und Beschleunigungsmaß im Bezug zum FCFS c) für steigende Kerzenmengen bei maximaler Produktvarianz.

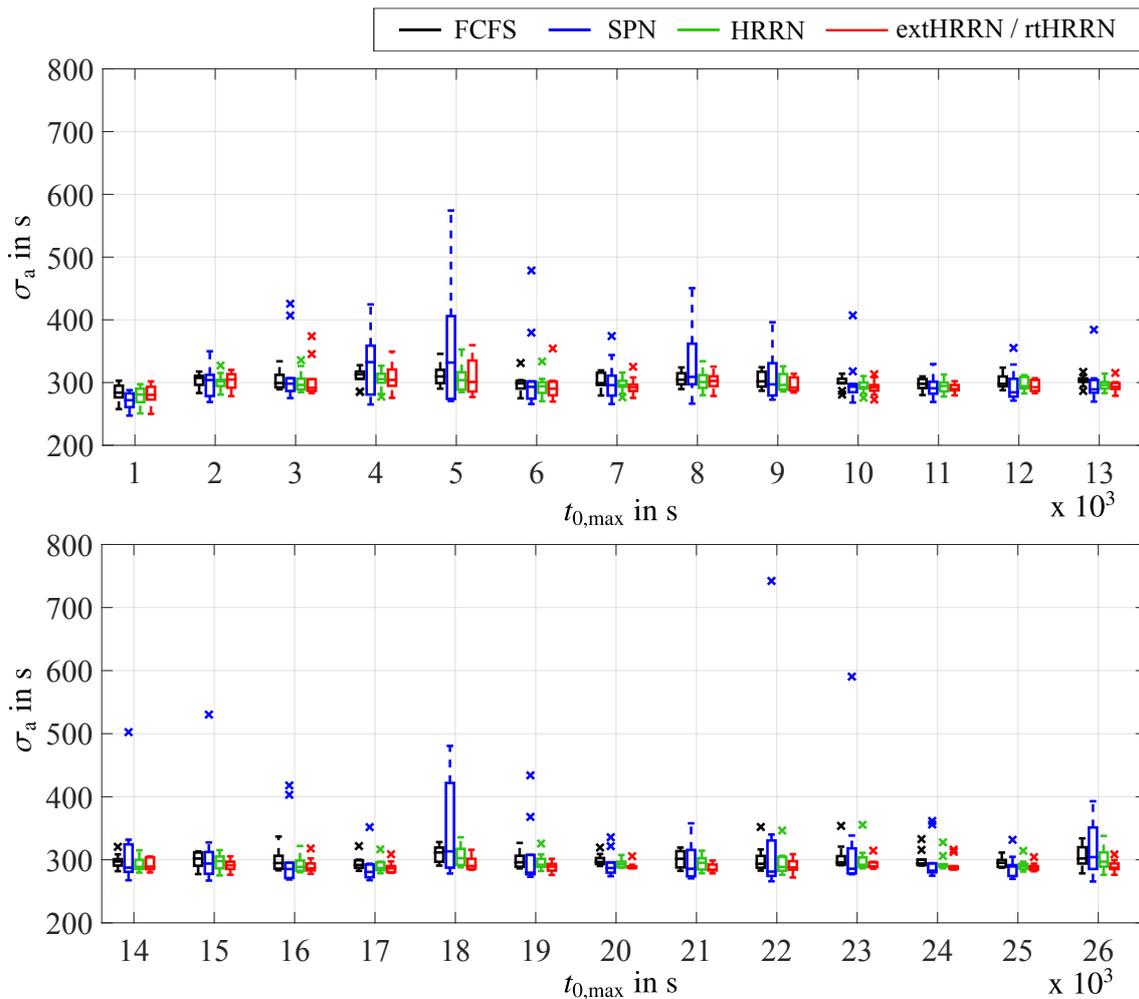


Bild 8-21: Kastendiagramm der Standardabweichung aller Antwortzeiten in Abhängigkeit der ansteigenden maximalen Ankunftszeit für vier Schedulingverfahren bei maximaler Produktvarianz

Untersuchung der entstandenen Werkzeugwechsel bei maximaler Varianz

Die Untersuchung der mittleren Werkzeugwechsellanzahl, welche in Bild 8-22 a) dargestellt ist, zeigt ebenso wie bei der minimalen Produktvarianz einen linearen Anstieg mit zunehmender Kerzenanzahl N_{KE} . Wiederum weist der extHRRN / rtHRRN, gefolgt vom SPN, die geringste Anzahl an benötigten Werkzeugwechseln auf. Der HRRN benötigt analog zur Untersuchung bei minimaler Produktvarianz ΔP_v^A in den meisten Fällen mehr Werkzeugwechsel als der FCFS. Dies geht auch aus den Betrachtungen der Differenz ΔN_{RT} im Bild 8-22 b) hervor. Prozentual betrachtet spart das extHRRN / rtHRRN minimal 10,5 % und maximal 18,11 % der Werkzeugwechsel ein (siehe Bild 8-22 c). Beim SPN schwankt es hingegen zwischen 0,4 % und 8 %.

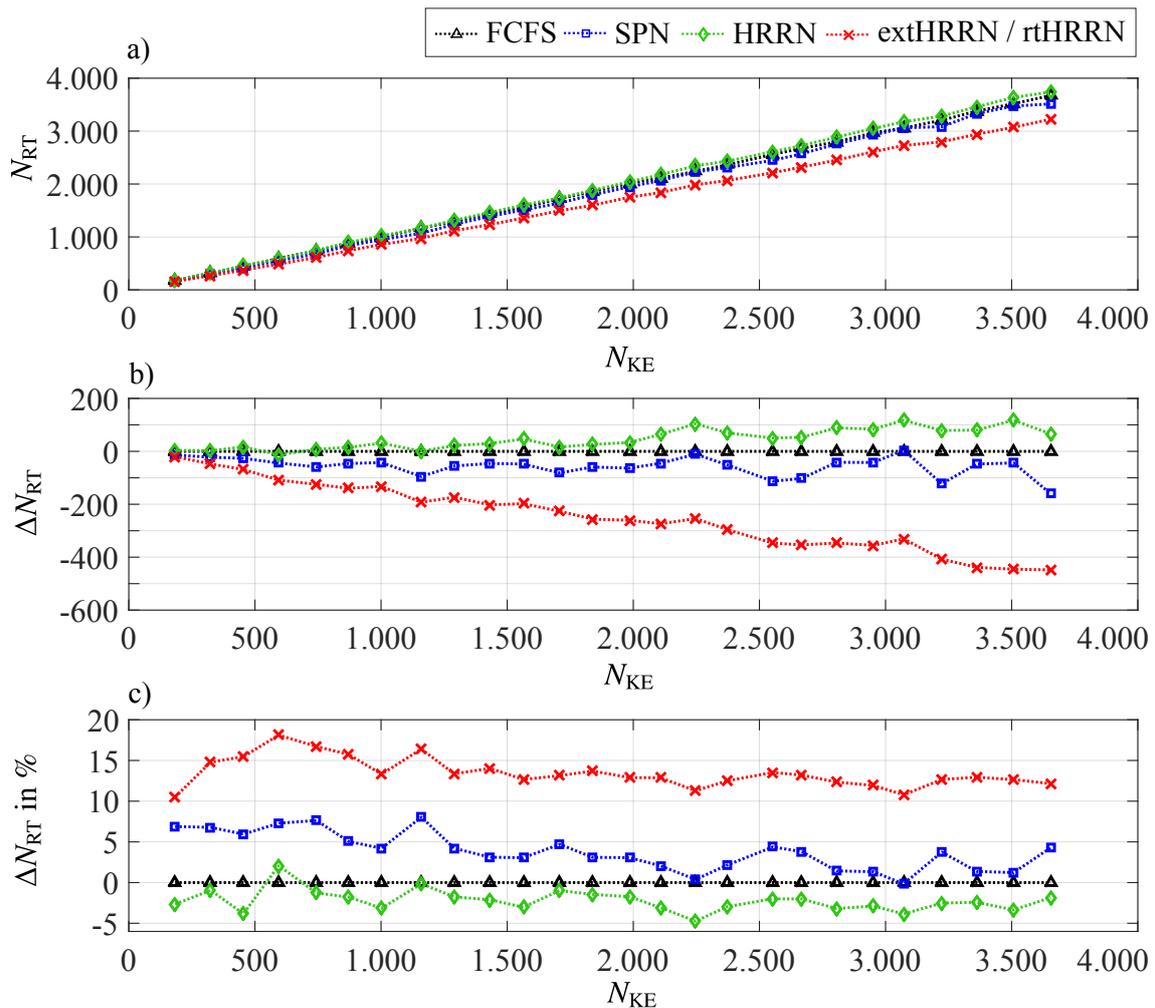


Bild 8-22: Tendenz der Werkzeugwechsel bei maximaler Kerzenvarianz in Abhängigkeit der Kerzenanzahl: a) absolute Werkzeugwechsellanzahl, b) Differenz im Bezug zum FCFS und c) relative Anzahl an Werkzeugwechsel im Bezug zum FCFS.

8.2.4 Fazit zur Simulationsstudie

Innerhalb der Studie wurde die zellenbasierte Fertigung der Produktvarianz ΔP_v^A mit acht und zum anderen mit 32 Kerzenvarianten ΔP_v^B bis hin zu einer dauerhaften Produktionsdauer von acht Stunden durchgeführt. Dies entspricht in etwa einer maximalen Ankunftszeit von 26.000 Sekunden und einer Anzahl von circa 3.600 gefertigten Kerzen. Hierbei wurden jeweils die Fertigung der insgesamt 260 generierten Produktverteilungen mit zufälliger Losgröße, Ankunftszeit, Kerzenvarianten und Priorität vom FCFS-, SPN-, HRRN und dem extHRRN / rtHRRN-Scheduler geplant. Die Bilder 8-23 a) und b) zeigen das Beschleunigungsmaß α_{FCFS} für den SPN, HRRN und extHRRN / rtHRRN Scheduler in Abhängigkeit der Produktvarianz ΔP_v^A sowie ΔP_v^B . Der klassische HRRN zeigt tendenziell ein schwankendes Beschleunigungsmaß welches, sich im Bereich zwischen $\pm 5\%$ im Vergleich zum FCFS ändert. Im Gegensatz dazu zeigt der SPN für beiden Produktvarianzen immer eine Verbesserung, die sich im Bereich zwischen 4 % und 20 % bewegt.

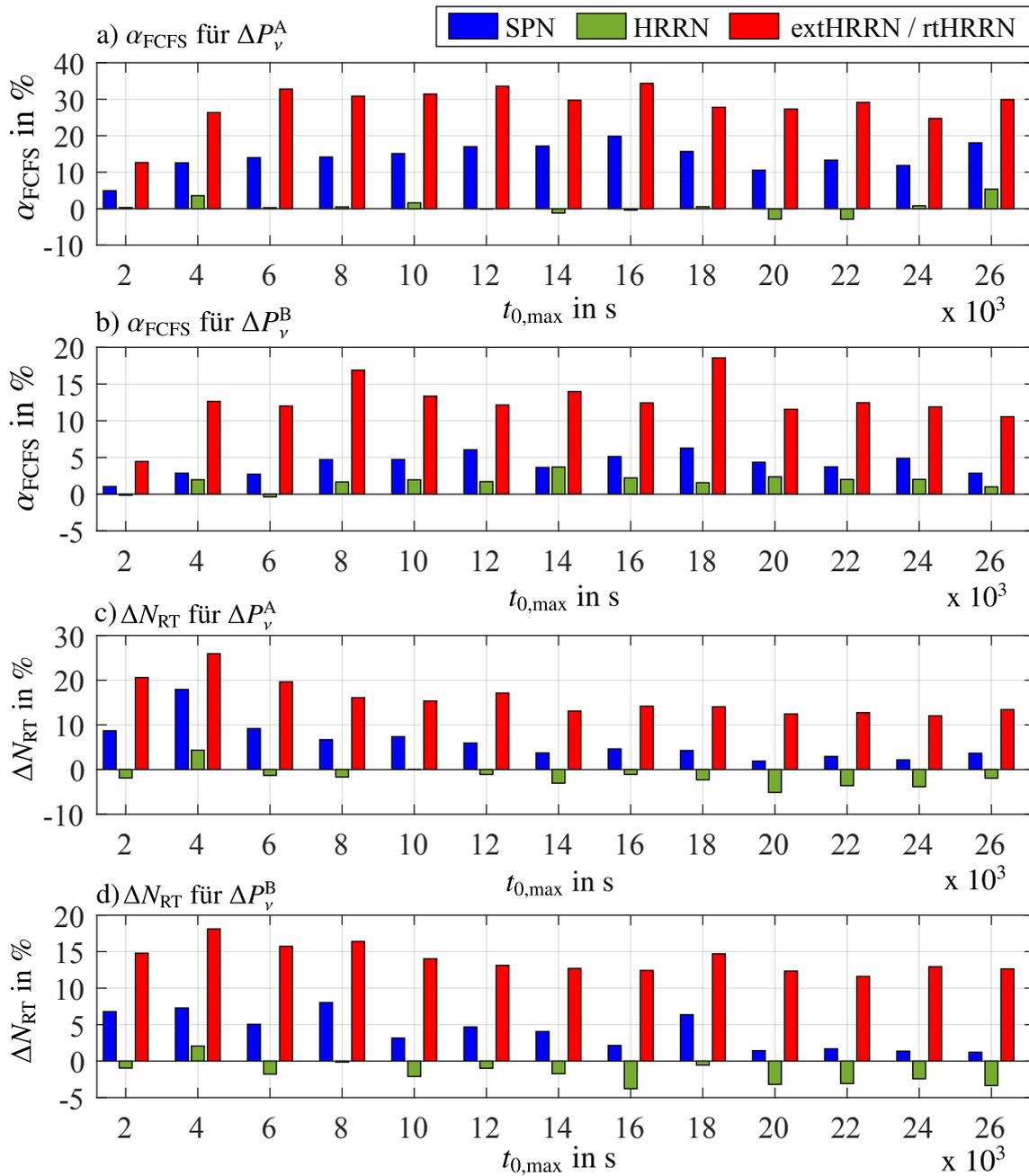


Bild 8-23: Zusammenfassung der Simulationsstudie auf Basis des Beschleunigungsmaßes und der relativen eingesparten Werkzeugwechsel in Abhängigkeit beider Produktvarianzen

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte extHRRN / rtHRRN Verfahren zeigt stets eine Verbesserung, die im Bereich zwischen 5 % und 33 % liegt. Bei der minimalen Produktvarianz ΔP_v^A ist α_{FCFS} nahezu immer $\geq 25\%$. Im Falle von ΔP_v^B ist α_{FCFS} in der Regel $> 10\%$.

Laut CONWAY et al. ist der SPN optimal hinsichtlich der mittleren Antwortzeit [CMM67]. Die optimale Sortierung kann allerdings nur für die Kerzenbestellungen vorgenommen werden, die zu einem Zeitpunkt bekannt sind. Innerhalb der Simulationsstudie wird ein Bestellzeithorizont von einer zufälligen Ankunftszeit der Bestellungen bis hin zu einer maximalen Ankunftszeit betrachtet, welches den Charakter einer Fertigung mit kleinen Losgrößen bis hin zur Einzel-Stück-Fertigung widerspiegelt. Somit liegt immer nur ein geringer Planungshorizont vor. Zudem kann es beim SPN zum Verhungern von Produkten kommen, die aufgrund ihrer Beschaffenheit eine hohe Bearbeitungszeit benötigen. Des Weiteren berücksichtigt der SPN keine kunden- bzw. produktindividuellen Prioritäten, die sich aus Sicht der Planung positiv oder negativ auswirken können. Beispielsweise kann ein Produkt mit großer Bearbeitungszeit aufgrund seiner hohen Priorität bevorzugt werden. Im Gegensatz dazu wirkt sich ein Produkt mit hoher Priorität und geringer Bearbeitungsdauer positiv auf das Scheduling aus.

Aus den Bildern 8-23 c) und d) ist zu entnehmen, dass der klassische HRRN tendenziell betrachtet mehr Werkzeugwechsel verursacht als der FCFS Scheduler, der die Reihenfolge der ankommenden Kerzenbestellungen nacheinander abarbeitet. Somit wirkt sich die klassische Alterungsfunktion des HRRN zum Teil negativ aus und verursacht zusätzliche Werkzeugwechsel. Der SPN sorgt im Vergleich zum FCFS stets für eine Einsparung von Werkzeugwechseln, die für ΔP_v^A im Bereich zwischen 3 % und 18 % liegt. Bei maximaler Produktvarianz liegt die Einsparung zwischen 2 % und 8 %. Der SPN berücksichtigt eine Reduzierung der Werkzeugwechsel nicht explizit, allerdings werden die Kerzenbestellungen in Abhängigkeit einer ansteigenden Bearbeitungszeit sortiert. Dies sorgt dafür, dass viele möglichst gleiche Kerzen hintereinander in der globalen Warteschlange angeordnet sind und zum Teil auf die gleichen Zellen und Maschinen zugewiesen werden. Dies reduziert ebenfalls die Anzahl an Werkzeugwechseln. Im Vergleich zu den anderen Ansätzen berücksichtigt der neu entwickelte zellinterne rtHRRN Scheduler aktiv die entstehenden Werkzeugwechsel im Nenner des Antwortquotienten (siehe Gleichung (6-7)). Hierdurch können im Falle der minimalen Produktvarianz Werkzeugwechsel im Bereich zwischen 12 % und 25 % eingespart werden. Für ΔP_v^B wird eine Einsparung von 12 % bis 18 % erreicht.

Durch die Reduzierung der Werkzeugwechsel und Verringerung der mittleren Antwortzeit sind Unternehmen in der Lage eine höhere Auslastung ihrer zellenbasierten Fertigung mit kleinen Losgrößen zu erreichen und langfristig gesehen, ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit werden zunächst die Definition und die Anforderungen an ein produkttolerantes zellenbasiertes Fertigungssystem auf Basis der Topologie von flexiblen Fertigungssystemen, der Produktintelligenz und des Standes der Wissenschaft und Technik erarbeitet. Darauf aufbauend werden die Ziele in Abschnitt 4.5 definiert, die im Wesentlichen zur Entwicklung von zwei technologischen Neuerungen führen.

Zum einen handelt es sich um eine hochflexible vernetzte Steuer- und Regelung, die mithilfe eines produkttoleranten Rekonfigurators in der Lage ist mit intelligenten Produkten in Abhängigkeit ihrer Fähigkeiten zu kommunizieren bzw. interagieren. Hierdurch kann die Dynamik einer Maschine oder Fertigungszelle unter Berücksichtigung jedes einzelnen Produktbedürfnisses bzw. der Produkteigenschaften im Sinne einer Ein-Stück-Fertigung mit hoher Variantenvielfalt rekonfiguriert werden. Mittels eines Entwurfleitfadens werden an einem realen Prüfstand zur Abbildung eines flexiblen produktabhängigen Transportszenarios und an einem Simulationsmodell eines Handling-Systems, der Entwurf, die Synthese und die Validierung einer produkttoleranten Steuer- und Regelung durchgeführt. Hierdurch kann die dezentrale Autonomie und Interaktionsfähigkeit einer Maschine innerhalb eines zellenbasierten Fertigungsprozesses gesteigert werden. Dies ermöglicht die Realisierung unterschiedlichster Flexibilitätsarten auf unterster Produktionsebene.

Zum Anderen wird ein neuartiges hochflexibles zweistufiges dynamisches Planungsverfahren auf Basis des Highest Response Ratio Next Schedulers (HRRN) für zellenbasierte Fertigungssysteme entwickelt. Hierbei plant der globale Scheduler die Zuweisung der intelligenten Produkte auf die Fertigungszellen. Im Gegensatz dazu nimmt der zellinterne Scheduler die Planung und Allokierung der Produkte auf die Maschinen innerhalb einer Fertigungszelle vor. Die wesentlichen Vorteile dieses Verfahrens sind die gezielte Ausnutzung der Zell- und Maschinentopologie, kein Verhungern von Aufträgen, Berücksichtigung der Variantenvielfalt eines Produktes, dynamische Prioritätssteuerung eines Auftrages auch während des Fertigungsprozesses, Berücksichtigung von Werkzeugwechseln und keine Unterbrechung von laufenden Fertigungsschritten. Für die Analyse unterschiedlichster zellenbasierter Fertigungstopologien und Schedulingverfahren wird eine unter MATLAB entwickelte Simulationsumgebung vorgestellt, die unterschiedlichste Betrachtungsweisen, d.h. vom Fertigungsablauf eines einzelnen Produktes bis hin zur Performanzuntersuchung einer Produktionsschicht, ermöglicht. Basis hierfür ist ein zufällig arbeitender Produktgenerator, der Bestellungen mit variabler Losgröße, Ankunftszeit, Priorität und möglicher Variante, generiert.

Abschließend wurden alle neuen Technologien bzw. Ansätze innerhalb eines im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Demonstratorszenarios einer produkttoleranten zellenbasierten Kerzenfertigung mit hoher Variantenvielfalt appliziert und validiert. Hierfür wurde ein Prototyp einer produkttoleranten Wachsabfüllmaschine entwickelt und realisiert, der in der Lage ist auf Basis mehrerer produkttoleranter Rekonfiguratoren und eines eigens entwickelten intelligenten Kerzenträgers bis zu acht unterschiedliche Glaskerzenvarianten zu fertigen. Zur Untersuchung, dem Vergleich und der Performanzanalyse wurde die eigens entwickelte MATLAB Simulationsumgebung verwendet, welche die dynamische Planung des aus bis zu sechs Fertigungszellen bestehenden Prozesses vornimmt.

Basierend darauf wurde das neuartige Planungsverfahren in umfangreichen Simulationsstudien, welche insgesamt eine dauerhafte Fertigung von circa 56 Wochen abbilden, mit drei anderen Scheduling-Verfahren verglichen.

Hierbei zeigte sich, dass das in dieser Arbeit entwickelte extHRRN / rtHRRN Verfahren im Vergleich zum First Come First Serve (FCFS), dem Shortest Process Next (SPN) und dem klassischen HRRN im Durchschnitt geringere mittlere Antwortzeiten zur Fertigung der Kerzen aufweist, bei gleichzeitiger Reduzierung der Werkzeugwechsel. Im Vergleich zum FCFS konnte die Abarbeitung der Bestellungen bei einer Produktvarianz von acht unterschiedlichen Kerzen im Durchschnitt um circa 30 % gesteigert und eine durchschnittliche Einsparung der Werkzeugwechsel von etwa 14 % erreicht werden. Bei 32 Kerzenvarianten erreichte der extHRRN / rtHRRN im Vergleich zum FCFS eine Beschleunigung von durchschnittlich 14 % für die Fertigung einer Kerze. Die Einsparung von Werkzeugwechseln liegt im Durchschnitt bei circa 12 %.

Die echtzeitfähige Implementierung des zellinternen Schedulingverfahrens rtHRRN, welcher im Rahmen dieser Arbeit entstand, wurde bereits in [Pol16] auf einer handelsüblichen SPS der Firma B&R demonstriert. Für die vollständige Realisierung sollte das globale extHRRN-Verfahren innerhalb eines MES-Systems bzw. Leitsystems integriert werden, welches über eine gesamtheitliche Sicht des zellenbasierten Fertigungsprozesses verfügt.

Innerhalb des Szenarios für die Kerzenfertigung wird die Transportdauer zwischen den einzelnen Fertigungszellen in erster Näherung als fest vorgegebene Zeitkonstante betrachtet. In einem Fertigungsprozess mit intelligenten Produkten ist es jedoch denkbar, dass diese sich selbstständig den Weg durch die Produktion suchen und mit Weichen sowie möglichen Zwischenpuffern interagieren. Für zukünftige Untersuchungen könnte das Szenario um die Erweiterungen ergänzt werden, welche möglicherweise zu einer steigenden Durchlaufflexibilität führt.

Im Laufe dieser Arbeit wurden die vorkommenden Warteschlangen und deren Verhalten nicht näher untersucht. Mit einer Betrachtungsweise wie bspw. als MARKOW-Ketten könnten die Warteschlangen modelliert, analysiert und hinsichtlich eines Optimierungskriteriums ausgelegt werden. Hierdurch könnte sich bspw. die maximal zulässige Bestellrate erhöhen. Des Weiteren wurden innerhalb der Simulationsstudie keine Materialengpässe, wie zum Beispiel leere Schmelztiegel oder ein leeres Kerzenglas magazin, berücksichtigt. Für zukünftige Betrachtungen sollten diese in Realität auftretenden Störungen mit einbezogen werden.

Literatur

- [Abe90] ABEL, D.: *Petri-Netze für Ingenieure: Modellbildung und Analyse diskret gesteuerter Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990. ISBN: 9783642956034.
- [AN15] AZAB, A.; NADERI, B.: Modelling the Problem of Production Scheduling for Reconfigurable Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 33 (2015), S. 76–80. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2015.06.015
- [BAD⁺15] BETTENHAUSEN, K.; ADAMCZYK, H.; DAUM, W.; DIRZUS, D.; FIGALIST, H.; HEIM, M.; JUMAR, U.; LEONHARDT, S.; ROOS, E.; URBAS, L.; WINTERHALTER, C.: *Automation 2025: Thesen und Handlungsfelder*. Hrsg. von VDI/VDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. 2015
- [Bak14] BAKULE, L.: Decentralized control: Status and outlook. *Annual Reviews in Control* 38 (2014), Nr. 1, S. 71–80. ISSN: 13675788. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2014.03.007
- [Bau13] BAUM, D.: *Grundlagen der Warteschlangentheorie*. Heidelberg: Springer, 2013. ISBN: 9783642396328
- [Bau14] BAUERNHANSL, T.: *Die Vierte Industrielle Evolution - Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma*. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien und Migration*. Hrsg. von BAUERNHANSL, T.; TENHOMPEL, M.; VOGEL-HEUSER, B. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-658-04681-1
- [BBB15] BARUAH, S. K.; BERTOIGNA, M.; BUTTAZZO, G. C.: *Multiprocessor scheduling for real-time systems*. In: *Embedded systems*. Hrsg. von DUTT, D.; GRANT, M.; MARWEDEL, P. Springer, 2015. ISBN: 9783319086958
- [BBGV16] BECKER, T.; BIRLE, S.; GÖTZ, G.; VOIGT, T.: *RoboFill 4.0 - starre Anlagenkonzepte auflösen*. Computer & Automation online, 17.10.2016.
- [BBM00] BEMPORAD, A.; BORRELLI, F.; MORARI, M.: Optimal controllers for hybrid systems: stability and piecewise linear explicit form. *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*. 2000, S. 1810–1815. DOI: 10.1109/CDC.2000.912125
- [BET15] BERTELSMEIER, F.; ENGELMEIER, T.; TRÄCHTLER, A.: Online-Rekonfiguration hybrider Regelkreise in Abhängigkeit variierender Produkteigenschaften. *Tagungsband Mechatronik 2015*. Dortmund, 2015, S. 97–102. ISBN: 978-3-00-048814-6
- [BG09] BADR, I.; GOHNER, P.: An agent-based approach for scheduling under consideration of the influencing factors in FMS. *Proceedings of the IECON 2009 - 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON)*. 2009, S. 2405–2410. DOI: 10.1109/IECON.2009.5415247

- [BGH⁺13] BRETTHAUER, G.; GERLACH, G.; HARBACH, F.; WESTERKAMP, D.; BETTENHAUSEN, K.: *Automation 2020, 2.Auflage: Bedeutung und Entwicklung der Automation bis zum Jahr 2020*. Hrsg. von VDI/VDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. 2013
- [Bha08] BHAT, U. N.: *An introduction to queueing theory: Modeling and analysis in applications*. In: *Statistics for industry and technology*. Hrsg. von BALAKRISHNAN, N. Boston, Mass. und London: Birkhäuser und Springer, 2008. ISBN: 0817647244
- [BK13] BETTENHAUSEN, K.; KOWALEWSKI, S.: *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation*. Hrsg. von VDI/VDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. 2013
- [BKLS06] BLANKE, M.; KINNAERT, M.; LUNZE, J.; STAROSWIECKI, M.: *Diagnosis and fault-tolerant control*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2006. ISBN: 3-540-35652-5
- [BPT16] BERTELSMEIER, F.; POLLMANN, J.; TRÄCHTLER, A.: A HRRN based scheduling for FMS and RMS with networked control and product-intelligence. *Proceedings of 2016 IEEE 42th IECON - Industrial Electronics Society*. 2016, S. 1–6
- [BSBS00] BUSS, M.; STRYK, O. v.; BULIRSCH, R.; SCHMIDT, G.: Towards Hybrid Optimal Control. *at - Automatisierungstechnik* 48 (2000), Nr. 9/2000. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1524/auto.2000.48.9.448
- [BST16] BERTELSMEIER, F.; SCHÖNE, S.; TRÄCHTLER, A.: Development and design of intelligent product carriers for flexible networked control of distributed manufacturing processes. *Proceedings of 2016 IEEE 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. 2016, S. 755–760. DOI: 10.1109/MED.2016.7535856
- [BSW01] BLANKE, M.; STAROSWIECKI, M.; WU, N. E.: Concepts and methods in fault-tolerant control. *American Control Conference*. 2001, S. 2606–2620. DOI: 10.1109/ACC.2001.946264
- [BT15] BERTELSMEIER, F.; TRÄCHTLER, A.: Decentralized Controller Reconfiguration Strategies for Hybrid System Dynamics based on Product-Intelligence. *Proceedings of 2015 IEEE 20th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Luxembourg, Luxembourg, 2015
- [BTT13] BORANGIU, T.; THOMAS, A.; TRENTESAUX, D.: *Service orientation in holonic and multi agent manufacturing and robotics*. Studies in computational intelligence, Bd. 472. Berlin und New York: Springer, 2013. ISBN: 3642358527
- [BTT15] BORANGIU, T.; THOMAS, A.; TRENTESAUX, D.: *Service Orientation in Holonic and Multi-agent Manufacturing*. Studies in computational intelligence, Bd. 594. Springer International Publishing, 2015. ISBN: 978-3-319-15158-8
- [Bus02] BUSS, M.: *Methoden zur Regelung hybrider dynamischer Systeme: Modelle, Regelkreise, Optimalsteuerung, Rechnerwerkzeuge und Mechatronik-Anwendungen*. Fortschritt-Berichte / VDI Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Bd. 970. Düsseldorf: VDI-Verl., 2002. ISBN: 9783183970087

- [But11] BUTTAZZO, G. C.: *Hard real-time computing systems: Predictable scheduling algorithms and applications*. Real-time systems series, 3rd ed. New York: Springer, 2011. ISBN: 1461406757
- [BVH⁺15] BERTELSMEIER, F.; VATHAUER, M.; HENKE, C.; VATHAUER, K.-E.; TRÄCHTLER, A.: Produkt- und lastabhängiges dezentrales Motormanagement für die Fördertechnik: Anforderungen, Design und Applikation. *Automation 2015*. Düsseldorf: VDI-Verl, 2015. ISBN: 9783180922584
- [CDD⁺00] CHOUIKHA, M.; DECKNATEL, G.; DRATH, R.; FREY, G.; MÜLLER, C.; SIMON, C.; THIEME, J.; WOLTER, K.: Petri Net-Based Descriptions for Discrete-Continuous Systems. *at - Automatisierungstechnik* 48 (2000), Nr. 9/2000. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1524/auto.2000.48.9.415
- [CGW05] CHUN WANG; GHENNIWA, H.; WEIMING SHEN: Heuristic scheduling algorithm for flexible manufacturing systems with partially overlapping machine capabilities. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2005, S. 1139–1144. DOI: 10.1109/ICMA.2005.1626713
- [CKPT10] CHEMNITZ, M.; KRÜGER, J.; PATZLAFF, M.; TUGULDUR, E.-O.: SOPRO - Advancements in the self-organising production. *Proceedings of the 2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. 2010, S. 1–4. DOI: 10.1109/ETFA.2010.5641198
- [CL08] CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S.: *Introduction to Discrete Event Systems, 2nd ed.* Boston, MA: Springer Science+Business Media, LLC, 2008. ISBN: 978-0-387-33332-8
- [CMM67] CONWAY, R. W.; MAXWELL, W. L.; MILLER, L. W.: *Theory of scheduling*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co, 1967. ISBN: 0-201-01189-1
- [CSO⁺06] CHENG, M.; SUGI, M.; OTA, J.; YAMAMOTO, M.; ITO, H.; INOUE, K.: A fast rescheduling method in semiconductor manufacturing allowing for tardiness and scheduling stability. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. 2006, S. 100–105. DOI: 10.1109/COASE.2006.326862
- [CTT08] COLLEDANI, M.; TERKAY, W.; TOLIO, T.: *Product-Process-System Information Formalization*. In: *Design of flexible production systems: Methodologies and tools*. Hrsg. von TOLIO, T. Berlin und London: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-85413-5
- [Dan09] DANGELMAIER, W.: *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung: Im Sommer keine Kirschpralinen?* VDI-Buch. Dordrecht und New York: Springer, 2009
- [DL14] DEMIR, O.; LUNZE, J.: Synchronization of multi-agent systems with event-based communication. *at - Automatisierungstechnik* 62 (2014), Nr. 8. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1515/auto-2013-1038
- [DLM09] DAMM, M.; LEITNER, S.-H.; MAHNKE, W.: *OPC Unified Architecture*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 3540688994

- [EAMA12] EL-TAMIMI, A. M.; ABIDI, M. H.; MIAN, S. H.; AALAM, J.: Analysis of performance measures of flexible manufacturing system. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* 24 (2012), Nr. 2, S. 115–129. ISSN: 10183639. DOI: 10.1016/j.jksues.2011.06.005
- [EFS02] ENGELL, S.; FREHSE, G.; SCHNIEDER, E.: *Modelling, analysis, and design of hybrid systems*. In: *Lecture notes in control and information sciences*, Bd. 279. Berlin und New York: Springer, 2002. ISBN: 9783540438120
- [EM08] EGERSTEDT, M.; MISHRA, B.: *Hybrid systems: computation and control*. In: *Lecture notes in computer science*, Bd. 4981. Hrsg. von Goos, G.; HARTMANIS, J.; J., L. Berlin, Heidelberg und New York, NY: Springer, 2008. ISBN: 3540789286
- [eps14] EPS AUTOMATION: *Datenblatt Handlingsystem EDP mini*. 2014.
- [EW09] ELMARAGHY, H.; WIENDAHL, H.-P.: *Changeability - An Introduction*. In: *Changeable and reconfigurable manufacturing systems*. Hrsg. von ELMARAGHY, H. Springer series in advanced manufacturing. New York und London: Springer, 2009. ISBN: 1848820666
- [FM10] FINKENZELLER, K.; MÜLLER, D.: *RFID handbook: Fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication, third edition*. 3rd ed. Chichester, West Sussex, U.K: Wiley, 2010. ISBN: 978-0-470-69506-7
- [Föl13] FÖLLINGER, O.: *Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. 11., völlig neu bearb. Aufl. Berlin: VDE-Verl., 2013. ISBN: 3800732319
- [GB09] GAHAM, M.; BOUZOUIA, B.: Intelligent product-driven manufacturing control: A mixed genetic algorithms and machine learning approach to product intelligence synthesis. *Proceedings of the 2009 XXII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT 2009)*. 2009, S. 1–8. DOI: 10.1109/ICAT.2009.5348452
- [GB12] GEISBERGER, E.; BROY, M.: *agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*. 2012
- [GC13] GEES, A.; CORBAN, M.: Gesucht wird: eine Sprache für Fertigungsanweisungen: Round-Table-Gespräch zu Industrie 4.0: Wettbewerbsfähig produzieren. *elektro AUTOMATION* 2013 (2013), Nr. 12, S. 20–25
- [GCLC16] GAMBOA QUINTANILLA, F.; CARDIN, O.; L'ANTON, A.; CASTAGNA, P.: A Petri net-based methodology to increase flexibility in service-oriented holonic manufacturing systems. *Computers in Industry* 76 (2016), S. 53–68. ISSN: 01663615. DOI: 10.1016/j.compind.2015.09.002
- [Gro08] GROSS, D.: *Fundamentals of queueing theory*. 4th ed. Wiley series in probability and statistics. Hoboken, N.J.: Wiley, 2008. ISBN: 978-0-471-79127-0
- [HL05] HRISTU-VARSAKELIS, D.; LEVINE, W. S.: *Handbook of networked and embedded control systems*. Control engineering. Boston: Birkhäuser, 2005. ISBN: 0-8176-3239-5

- [HLST01] HANISCH, H.-M.; LAUTENBACH, K.; SIMON, C.; THIEME, J.: Modeling and Validation of Hybrid Systems using Extended Timestamp Nets. *at - Automatisierungstechnik* 49 (2001), Nr. 2/2001. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1524/auto.2001.49.2.60
- [HM03] HODRUS, T.; MÜNZ, E.: Hybride Phänomene in zeitdiskreter Darstellung (Hybrid Phenomena Presented in Discrete Time). *at - Automatisierungstechnik* 51 (2003), Nr. 12-2003, S. 574–583. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1524/auto.51.12.574.22704
- [Hod08] HODRUS, T. E.: *Prozessführungsstrategien für hybride Systeme*. In: Schriften des Instituts für Regelungs- und Steuerungssysteme, Universität Karlsruhe (TH), Band 3. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe, 2008. ISBN: 3866442270
- [HR15] HEES, A.; REINHART, G.: Approach for Production Planning in Reconfigurable Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 33 (2015), S. 70–75. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2015.06.014
- [HS16] HAUPT, A.; STEFFEN, T.: Zwei Methoden zum Entwurf ressourcenschonender funkbasierter digitaler Regelungssysteme. *at - Automatisierungstechnik* 64 (2016), Nr. 6. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1515/auto-2016-0028
- [HS98] HENZINGER, T. A.; SASTRY, S.: *Hybrid systems: Computation and control*. In: *Lecture notes in computer science, Bd. 1386*. Berlin und New York: Springer, 1998. ISBN: 9783540643586
- [Irr14] IRRENHAUSER, T.: *Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz*. Forschungsberichte des IWB, Bd. 288. München: Utz, 2014. ISBN: 3831644047
- [Jan10] JANSCHKE, K.: *Systementwurf mechatronischer Systeme: Methoden, Modelle, Konzepte*. Heidelberg: Springer, 2010. ISBN: 978-3-540-78876-8
- [JGV11] JOSEPH, C.; GEORGE, V. I.; VENKATESWARAN, P. R.: Hybrid modeling and discrete controller design of three-tank benchmark system. *Proceedings of the 2011 2nd International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA)*. 2011, S. 170–174. DOI: 10.1109/ICA.2011.6130150
- [KHE⁺01] KOWALEWSKI, S.; HERRMANN, P.; ENGELL, S.; HUUCK, R.; KRUMM, H.; LAKHNECH, Y.; LUKOSCHUS, B.; TRESELER, H.: Approaches to the Formal Verification of Hybrid Systems. *at - Automatisierungstechnik* 49 (2001), Nr. 2/2001. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1524/auto.2001.49.2.66
- [Kol15] KOLBERG, D.: Informationsmodell für Cyber-Physische Systeme zur Beschreibung von Objekten von der Unternehmensebene bis zur Feldgeräteebene. *Automation 2015*. Düsseldorf: VDI-Verl, 2015. ISBN: 9783180922584
- [KSHN11] KRUGER, G. H.; SHIH, A. J.; HATTINGH, D. G.; NIEKERK, THEO I.: Intelligent machine agent architecture for adaptive control optimization of manufacturing processes. *Advanced Engineering Informatics* 25 (2011), Nr. 4, S. 783–796. ISSN: 14740346. DOI: 10.1016/j.aei.2011.08.003
- [KWH13] KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J.: *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Hrsg. von KAGERMANN, H. 2013

- [LI11] LATIP, R.; IDRIS, Z.: Highest Response Ratio Next (HRRN) vs First Come First Served (FCFS) Scheduling Algorithm in Grid Environment. *Proceedings of the Second International Conference of Software Engineering and Computer Systems; ICSECS 2011, Kuantan, Pahang, Malaysia, June 27-29. 2011*, S. 688–693
- [Lin08] LINMOT: *Kurzanleitung für das Einstellen der Regelung: Auszug aus dem User Manuel Release 1.3.16. 2008*
- [Lin14] LINMOT: *Application Note Loop Tuning - Commissioning of the closed loop position controller. 25.09.2014*
- [Lit12] LITZ, L.: *Grundlagen der Automatisierungstechnik: Regelungssysteme - Steuerungssysteme - Hybride Systeme. 2. Aufl.* München: Oldenbourg, R, 2012. ISBN: 978-3-486-70888-2
- [LL09] LUNZE, J.; LAMNABHI-LAGARRIGUE, F.: *Handbook of hybrid systems control: Theory, tools, applications.* Cambridge: Cambridge University Press, 2009. ISBN: 978-0-521-76505-3
- [LS13] LOSKYLL, M.; SCHLICK, J.: Cyber-Physische Produktionssysteme. *at – Automatisierungstechnik* 61 (2013), Nr. 10. ISSN: 0178-2312. DOI: 10.1515/auto.2013.0060
- [Lun09] LUNZE, J.: *Ereignisdiskrete Systeme: Modellierung und Analyse dynamischer Systeme mit Automaten, Markovketten und Petrinetzen ; mit 80 Anwendungsbeispielen und 110 Übungsaufgaben.* München und Wien: Oldenbourg, 2009. ISBN: 978-3-486-58071-6
- [Lun12] LUNZE, J.: *Automatisierungstechnik: Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme; mit 93 Anwendungsbeispielen und 99 Übungsaufgaben. 3., überarb. Aufl.* De Gruyter Oldenbourg, 2012. ISBN: 3486712667
- [Lun13] LUNZE, J.: Vernetzte Regelungen aus der Sicht der Theorie komplexer Netzwerke. *at – Automatisierungstechnik* 61 (2013), Nr. 10. ISSN: 0178-2312. DOI: 10.1515/auto.2013.1029
- [Lun14] LUNZE, J.: *Control Theory of Digitally Networked Dynamic Systems.* Springer, 2014. ISBN: 3319011316
- [Mal98] MALMBORG, J.: *Analysis and Design of Hybrid Control Systems.* Lund: Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, 1998
- [MFH09] MEYER, G. G.; FRÄMLING, K.; HOLMSTRÖM, J.: Intelligent Products: A survey. *Computers in Industry* 60 (2009), Nr. 3, S. 137–148. ISSN: 01663615. DOI: 10.1016/j.compind.2008.12.005
- [MGWH13] MCFARLANE, D.; GIANNIKAS, V.; WONG, A. C.; HARRISON, M.: Product intelligence in industrial control: Theory and practice. *Annual Reviews in Control* 37 (2013), Nr. 1, S. 69–88. ISSN: 13675788. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2013.03.003
- [MK00] McCLAMROCH, N. H.; KOLMANOVSKY, I.: Performance benefits of hybrid control design for linear and nonlinear systems. *Proceedings of the IEEE* 88 (2000), Nr. 7, S. 1083–1096. ISSN: 0018-9219. DOI: 10.1109/5.871310

- [MKRW11] MÄRZ, L.; KRUG, W.; ROSE, O.; WEIGERT, G.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Springer, 2011. ISBN: 978-3-642-14535-3
- [ML15] MOSEBACH, A.; LUNZE, J.: LQR design of synchronizing controllers for multi-agent systems. *at - Automatisierungstechnik* 63 (2015), Nr. 6. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1515/auto-2014-1124
- [Mon15] MONOSTORI, L.: Cyber-physical production systems: roots from manufacturing science and technology. *at - Automatisierungstechnik* 63 (2015), Nr. 10. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1515/auto-2015-0066
- [MRMB14] MORARIU, O.; RAILEANU, S.; MORARIU, C.; BORANGIU, T.: Multi-agent system for heterarchical product-driven manufacturing. *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*. 2014, S. 1–6. DOI: 10.1109/AQTR.2014.6857897
- [MSC⁺03] McFARLANE, D.; SARMA, S.; CHIRN, J. L.; WONG, C.; ASHTON, K.: Auto ID systems and intelligent manufacturing control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 16 (2003), Nr. 4, S. 365–376. ISSN: 09521976. DOI: 10.1016/S0952-1976(03)00077-0
- [MSD⁺08] MORANDIN, O.; SANCHES, D. S.; DERIZ, A. C.; KATO, E.; TSUNAKI, R. H.: An Adaptive Genetic Algorithm based approach for production reactive scheduling of manufacturing systems. *Proceedings of the IECON 2008 - 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*. 2008, S. 1461–1466. DOI: 10.1109/IECON.2008.4758169
- [Mün06] MÜNZ, E.: *Identifikation und Diagnose hybrider dynamischer Systeme*. Schriften des Instituts für Regelungs- und Steuerungssysteme, Universität Karlsruhe (TH), Bd. 1. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe, 2006. ISBN: 9783866440296
- [NA15] NADERI, B.; AZAB, A.: Modeling and scheduling a flexible manufacturing cell with parallel processing capability. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 11 (2015), S. 18–27. ISSN: 17555817. DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.05.006
- [Nen01] NENNINGER, G. M.: *Modellbildung und Analyse hybrider dynamischer Systeme als Grundlage für den Entwurf hybrider Steuerungen*. Fortschritt-Berichte / VDI Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Nr. 902. Düsseldorf: VDI-Verl., 2001. ISBN: 9783183902088
- [NH14] NOVAS, J. M.; HENNING, G. P.: Integrated scheduling of resource-constrained flexible manufacturing systems using constraint programming. *Expert Systems with Applications* 41 (2014), Nr. 5, S. 2286–2299. ISSN: 09574174. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.09.026
- [NK97] NENNINGER, G.; KREBS, V.: Modeling and analysis of hybrid systems: a new approach integrating Petri nets and differential equations. *Proceedings of the 5th International Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems and 3rd Workshop on Object-Oriented Real-Time Systems*. 1997, S. 234–238. DOI: 10.1109/WPDRTS.1997.637985

- [NNKL01] NENNINGER, G.; NIXDORF, B.; KREBS, V.; LUNZE, J.: Erreichbarkeitsanalyse hybrider Systeme (Reachability Analysis of Hybrid Systems). *at - Automatisierungstechnik* 49 (2001), Nr. 2/2001. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1524/auto.2001.49.2.75
- [NSK99] NENNINGER, G. M.; SCHNABEL, M. K.; KREBS, V. G.: Modellierung, Simulation und Analyse hybrider dynamischer Systeme mit Netz-Zustands-Modellen. *at - Automatisierungstechnik* 47 (1999), Nr. 3. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1524/auto.1999.47.3.118
- [OREM00] OTTER, M.; REMELHE, M.; ENGELL, S.; MOSTERMAN, P.: Hybrid Models of Physical Systems and Discrete Controllers. *at - Automatisierungstechnik* 48 (2000), Nr. 9/2000. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1524/auto.2000.48.9.426
- [Osm15] OSMIC, S.: Flachheitsbasierte Methode zum stoßfreien Umschalten von Reglerstrukturen. Dissertation. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn, 2015.
- [Ost12] OSTGATHE, M.: *System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage*. München: Herbert Utz Verlag, 2012. ISBN: 978-3-8316-4206-9
- [OT08] OSMIC, S.; TRACHTLER, A.: Flatness-based online controller reconfiguration. *Proceedings of the IECON 2008 - 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*. 2008, S. 204–209. DOI: 10.1109/IECON.2008.4757953
- [OZ13] OSTGATHE, M.; ZAEH, M. F.: System for product-based control of production processes. *Proceedings of the 2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Production and Logistics Systems (CIPLS)*. 2013, S. 138–144
- [PBT⁺04] POTOČNIK, B.; BEMPORAD, A.; TORRISI, F. D.; MUŠIČ, G.; ZUPANČIČ, B.: Hybrid modelling and optimal control of a Multiproduct Batch Plant. *Control Engineering Practice* 12 (2004), Nr. 9, S. 1127–1137. ISSN: 09670661. DOI: 10.1016/j.conengprac.2003.11.010
- [PF06] PANJAITAN, S.; FREY, G.: Product-driven control in manufacturing systems using IEC 61499 and RFID technology. *Proceedings of the 12th IFAC Symposium of Information Control Problems in Manufacturing (INCOM)*. 2006, S. 143–148. DOI: 10.3182/20060517-3-FR-2903.00089
- [PMD⁺14] PANTFÖRDER, D.; MAYER, F.; DIEDRICH, C.; GÖHNER, P.; WEYRICH, M.; VOGEL-HEUSER, B.: *Agentenbasierte dynamische Rekonfiguration von vernetzten intelligenten Produktionsanlagen - Evolution statt Revolution*. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien und Migration*. Hrsg. von BAUERNHANSL, T.; TENHOMPEL, M.; VOGEL-HEUSER, B. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-658-04681-1
- [PMT09] PANNEQUIN, R.; MOREL, G.; THOMAS, A.: The performance of product-driven manufacturing control: An emulation-based benchmarking study. *Computers in Industry* 60 (2009), Nr. 3, S. 195–203. ISSN: 01663615. DOI: 10.1016/j.compind.2008.12.007

- [Pol16] POLLMANN, J. F.: Entwicklung und Analyse eines produktgesteuerten Ressourcen- und Warteschlangenmanagements für eine verteilte Zellenbasierte rekonfigurierbare Fertigung. Bachelorarbeit. Paderborn: Universität Paderborn, 31.08.2016
- [Rum11] RUMPE, B.: *Modellierung mit UML: Sprache, Konzepte und Methodik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN: 978-3-642-22413-3
- [RWL15] REIMANN, S.; WU, W.; LIU, S.: PI control synthesis for event-triggered control systems. *at - Automatisierungstechnik* 63 (2015), Nr. 6. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1515/auto-2014-1164
- [SBS15] SCHULZ, D.; BRAUN, R.; SCHMITT, J.: Applying OPC UA: Low effort, low footprint. *Automation 2015*. Düsseldorf: VDI-Verl, 2015. ISBN: 9783180922584
- [Sch06] SCHUH, G.: *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 3., völlig neu bearb. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer, 2006. ISBN: 3540338551
- [SD15] SVENSSON, B.; DANIELSSON, F.: P-SOP – A multi-agent based control approach for flexible and robust manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 36 (2015), S. 109–118. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/j.rcim.2014.12.005
- [SE08] SUN, Y.; EL-FARRA, N. H.: Quasi-decentralized model-based networked control of process systems. *Computers & Chemical Engineering* 32 (2008), Nr. 9, S. 2016–2029. ISSN: 00981354. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2008.02.011
- [SGG16] SAGGIOMO, M.; GLOY, Y.-S.; GRIES, T.: Industrie 4.0 im Textilmaschinenbau. *etx elektrotechnik & automation*. Bd. 03/2016. VDE-Verl., 2016, S. 22–26
- [SLZ10] SEITZ, C.; LEGAT, C.; ZIYUAN LIU: Flexible manufacturing control with autonomous product memories. *Proceedings of the 2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. 2010, S. 1–8. DOI: 10.1109/ETFA.2010.5641185
- [SNK99a] SCHNABEL, M. K.; NENNINGER, G. M.; KREBS, V. G.: Konvertierung sicherer Petri-Netze in Statecharts/ Conversion of safe Petri nets into Statecharts. *at - Automatisierungstechnik* 47 (1999), Nr. 12. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1524/auto.1999.47.12.571
- [SNK99b] SCHNABEL, M. K.; NENNINGER, G.; KREBS, V.: Control of Hybrid Systems based on Net State Models. *Proceedings of the European Control Conference (ECC)*. 1999
- [SP16] STEINER, W.; POLEDNA, S.: Fog computing as enabler for the Industrial Internet of Things. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 133 (2016), Nr. 7, S. 310–314. ISSN: 0932-383X. DOI: 10.1007/s00502-016-0438-2
- [SPRD10] STURSBURG, O.; PASCHEDAG, T.; RUNGGER, M.; DING, H.: Hierarchische Modellierung und Regelung hybrider Systeme auf zwei Ebenen. *at - Automatisierungstechnik* 58 (2010), Nr. 8. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1524/auto.2010.0864

- [SSI03] SUGIMURA, N.; SHRESTHA, R.; INOUE, J.: Integrated process planning and scheduling in holonic manufacturing systems-optimization based on shop time and machining cost. *Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP'03)*. 2003, S. 36–41. DOI: 10.1109/ISATP.2003.1217184
- [Sta03] STALLINGS, W.: *Betriebssysteme: Prinzipien und Umsetzung*. 4., überarb. Aufl. München: Pearson Studium, 2003. ISBN: 3827371856
- [SVL13] STÖCKER, C.; VEY, D.; LUNZE, J.: Decentralized event-based control: Stability analysis and experimental evaluation. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems* 10 (2013), S. 141–155. ISSN: 1751570X. DOI: 10.1016/j.nahs.2013.05.001
- [Tab09] TABUADA, P.: *Verification and control of hybrid systems: A symbolic approach*. New York: Springer, 2009. ISBN: 1441902244
- [TTV08] TERKAY, W.; TOLIO, T.; VALENTE, A.: *Designing Manufacturing Flexibility in Dynamic Production Contexts*. In: *Design of flexible production systems: Methodologies and tools*. Hrsg. von TOLIO, T. Berlin und London: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-85413-5
- [TTV09] TERKAY, W.; TOLIO, T.; VALENTE, A.: *Focused Flexibility in Production Systems*. In: *Changeable and reconfigurable manufacturing systems*. Hrsg. von ELMARAGHY, H. Springer series in advanced manufacturing. New York und London: Springer, 2009. ISBN: 1848820666
- [UHK13] UHLMANN, E.; HOHWIEDER, E.; KRAFT, M.: Selbstorganisierende Produktion: Agenten intelligenter Objekte koordinieren und steuern den Produktionsablauf. *Industrie Management* (2013), Nr. 29, S. 57–61
- [VDB13] VOGEL-HEUSER, B.; DIEDRICH, C.; BROY, M.: Anforderungen an CPS aus Sicht der Automatisierungstechnik / Requirements on CPS from the Viewpoint of Automation. *at - Automatisierungstechnik* 61 (2013), Nr. 10. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1524/auto.2013.0061
- [VDI10] VDI/VDE: *VDI/VDE 2653 Blatt 1: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik - Grundlagen*. Berlin, Juni 2010
- [VDI12a] VDI/VDE: *VDI/VDE 2653 Blatt 2: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik - Entwicklung*. Berlin, Januar 2012
- [VDI12b] VDI/VDE: *VDI/VDE 2653 Blatt 3: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik - Anwendung*. Berlin, März 2012
- [VKBW09] VOGEL-HEUSER, B.; KEGEL, G.; BENDER, K.; WUCHERER, K.: Global Information Architecture for Industrial Automation. *atp edition* 2009 (2009), Nr. vol. 51, no 01-02, S. 108–115
- [VLL15] VOGEL-HEUSER, B.; LEE, J.; LEITÃO, P.: Agents enabling cyber-physical production systems. *at - Automatisierungstechnik* 63 (2015), Nr. 10. ISSN: 2196-677X. DOI: 10.1515/auto-2014-1153

- [VW13] VOOS, H.; WANGMANAOPITUK, S.: Multiagent-based flexible automation of microproduction systems including mobile transport robots. *Proceedings of the 2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. 2013, S. 1–7. DOI: 10.1109/ETFA.2013.6647959
- [WG15] WEYER, S.; GORECKY, D.: Fortschritt im Netzwerk: Realisierung einer modularen, herstellerübergreifenden Industrie 4.0 - Produktionsanlage. *Automation 2015*. Düsseldorf: VDI-Verl, 2015. ISBN: 9783180922584
- [WMAA02] WONG, C. Y.; McFARLANE, D.; AHMAD ZAHARUDIN, A.; AGARWAL, V.: The intelligent product driven supply chain. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*. 2002, S. 6. DOI: 10.1109/ICSMC.2002.1173319
- [WV06] WANNAGAT, A.; VOGEL-HEUSER, B.: Kopplung von regelungstechnischer Analyse und Agentensystemen. *Echtzeitsysteme im Alltag*. Hrsg. von HOLLECZEK, P.; VOGEL-HEUSER, B. Informatik aktuell. Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 36–45. ISBN: 978-3-540-47690-0. DOI: 10.1007/978-3-540-68217-25.
- [XX14] XU, J.; XIE, L.: *Control and Estimation of Piecewise Affine Systems*. Cambridge: Woodhead Pub Ltd, 2014. ISBN: 978-1-78242-161-0
- [YJC10] YANG, H.; JIANG, B.; COCQUEMPOT, V.: *Fault tolerant control design for hybrid systems*. In: *Lecture notes in control and information sciences*, Bd. 397. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. ISBN: 3642106811
- [ZO09] ZAEH, M. F.; OSTGATHE, M.: A multi-agent-supported, product-based production control. *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*. 2009, S. 2376–2383. DOI: 10.1109/ICCA.2009.5410562
- [ZZ04] ZHONGHUA, H.; ZHIMING, W.: A deadlock-free scheduling method for automated manufacturing systems using dynamic-edge graph with tokens. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications*. 2004, S. 1398–1403. DOI: 10.1109/CCA.2004.1387570

Anhang

Inhaltsverzeichnis

A1 Datenblätter	163
A1.1 Getriebegleichstrommotor 1/2	163
A1.2 Getriebegleichstrommotor 2/2	164
A1.3 Gleichstromantriebsmotor	165
A1.4 RFH 630 RFID Lese- und Schreibgerät	166
A1.5 EDP Mini Handlingsystem	167
A1.6 EDP Mini Handlingsystem - z-Linearachse	168
A1.7 EDP Mini Handlingsystem - y-Linearachse	169
A1.8 Abfüllventile (1/2)	170
A1.9 Abfüllventile (2/2)	171

A1.2 Getriebegleichstrommotor 2/2

GNM 31 - GP 48.2

1 Nennspannung	2 Nennzahl	3 Nennstrom	4 Anlaufmoment	5 Nennmoment bei Mischstrom	6 Nennleistung	7 Nennstrom	8 Nennstrom bei Mischstrom	9 Spitzenstrom	10 Leistung	11 Nennzahl	12 Übersetzung	13 Wirkungsgrad	Grenzbelastung Getriebe		17 Max. Verdrehspiel	18 Massenträgheitsmoment Getriebe ¹⁾	19 Gesamtgewicht Motor + Getriebe	20 Gesamtgewicht Motor + Getriebe + Bremse	21 F. (Zul. radiale Wellenlast) ²⁾	22 F. (Zul. axiale Wellenlast)	23 Motor-Typ		
													W	Nm								W	Nm
24	600	0,79	2,6	0,51	50	3,1	2,2	17,1	55	3000	5 : 1	90	63	1,0	3,0	80	0,00017x10 ⁻³	1,5	1,7	112	100	GNM 3150	
42						1,8	1,3	10,8															
24	500	0,95	3,2	0,61	50	3,1	2,2	17,1	55	3000	6 : 1	90	68	1,3	3,5	80	0,00012x10 ⁻³	1,5	1,7	112	100		
42						1,8	1,3	10,8															
24	392	1,0 ³⁾	3,0 ³⁾	0,79	41	2,7 ³⁾	2,2	12,8 ³⁾	46	3000	7,66:1	90	41	1,0	3,0	80	0,00007x10 ⁻³	1,5	1,7	112	100		
42						1,5 ³⁾	1,3	7,4 ³⁾															
24	143	3,1	11	2,0	47	3,1	2,2	17,1	55	3000	21 : 1	85	48	3,2	12	50	0,00015x10 ⁻³	1,6	1,8	150	110		
42						1,8	1,3	10,7 ³⁾															
24	120	3,7	13	2,4	47	3,1	2,2	17,1	55	3000	25 : 1	85	50	4,0	14,5	50	0,00014x10 ⁻³	1,6	1,8	150	110		
42						1,8	1,3	10,8															
24	100	4,5	14,5 ³⁾	2,9	47	3,1	2,2	15,7 ³⁾	55	3000	30 : 1	85	50	4,8	14,5	50	0,00010x10 ⁻³	1,6	1,8	150	110		
42						1,8	1,3	9,1 ³⁾															
24	83	5,4	16 ³⁾	3,5	47	3,1	2,2	14,5 ³⁾	55	3000	36 : 1	85	48	5,5	16	50	0,00010x10 ⁻³	1,6	1,8	150	110		
42						1,8	1,3	8,4 ³⁾															
24	65	5,6 ³⁾	16 ³⁾	4,5	38	2,6 ³⁾	2,2	11,4 ³⁾	45	3000	46 : 1	85	38	5,6	16	50	0,00006x10 ⁻³	1,6	1,8	150	110		
42						1,5 ³⁾	1,3	6,6 ³⁾															
24	51	6,0 ³⁾	16 ³⁾	5,7	32	2,3 ³⁾	2,2	9,0 ³⁾	38	3000	59 : 1	85	32	6,0	16	50	0,00006x10 ⁻³	1,6	1,8	150	110		
42						1,3 ³⁾	1,3	5,2 ³⁾															
24	32	7,2 ³⁾	18 ³⁾	4,8	24	2,0 ³⁾	1,4	6,8 ³⁾	30	3000	94 : 1	80	25	7,5	18	55	0,00015x10 ⁻³	1,5	1,7	180	150	GNM 3125	
42						1,2 ³⁾	0,81	4,1 ³⁾															
24	24	8,5 ³⁾	20 ³⁾	6,4	21	1,8 ³⁾	1,4	5,8 ³⁾	27	3000	125 : 1	80	21	8,5	20	55	0,00014x10 ⁻³	1,5	1,7	180	150		
42						1,0 ³⁾	0,81	3,4 ³⁾															
24	20	9,0 ³⁾	20 ³⁾	7,7	19	1,6 ³⁾	1,4	4,9 ³⁾	24	3000	150 : 1	80	19	9,0	20	55	0,00010x10 ⁻³	1,5	1,7	180	150		
42						0,94 ³⁾	0,81	2,9 ³⁾															
24	17	10,5 ³⁾	20 ³⁾	9,2	18	1,5 ³⁾	1,4	4,1 ³⁾	23	3000	180 : 1	80	18	10,5	20	55	0,00010x10 ⁻³	1,5	1,7	180	150		
42						0,92 ³⁾	0,81	2,4 ³⁾															
24	14	10,5 ³⁾	20 ³⁾	10,5	15	1,3 ³⁾	1,3	3,5 ³⁾	19	3000	216 : 1	80	15	10,5	20	55	0,00010x10 ⁻³	1,5	1,7	180	150		
42						0,80 ³⁾	0,80	2,1 ³⁾															
24	10	10,5 ³⁾	20 ³⁾	10,5	11	1,1 ³⁾	1,1	2,7 ³⁾	14	3000	293 : 1	80	11	10,5	20	55	0,00006x10 ⁻³	1,5	1,7	180	150		
42						0,64 ³⁾	0,64	1,6 ³⁾															
24	8,5	10,5 ³⁾	20 ³⁾	10,5	9,4	0,95 ³⁾	0,95	2,3 ³⁾	12	3000	352 : 1	80	9,4	10,5	20	55	0,00006x10 ⁻³	1,5	1,7	180	150		
42						0,57 ³⁾	0,57	1,4 ³⁾															
24	6,7	9,0 ³⁾	18 ³⁾	9,0	6,3	0,75 ³⁾	0,75	1,7 ³⁾	7,9	3000	450 : 1	80	6,3	9,0	18	55	0,00006x10 ⁻³	1,5	1,7	180	150		
42						0,45 ³⁾	0,45	1,0 ³⁾															

Toleranzen ± 10 %
 Zu Spalte 3 und 13
 Diese Getriebeverhältnisse gelten im betriebswarmen Zustand nach Einlaufphase.
 Zu Spalte 5 und 8
 Bei Mischstrom (Faktor 0,7), wie z.B. bei Gleichstrom aus Einphasen-Brückengleichrichtung mit Oberwellenanteil über 5%, dürfen die angegebenen Werte nicht überschritten werden.
 Zu Spalte 4 und 9
 Werte entsprechen der Getriebe- Grenzbelastung. Bei hohen Übersetzungen können die zulässigen Ströme geringer sein als die Nennströme der Motoren. Ströme dann geeignet begrenzen, z.B. durch Einstellung am Servoverstärker.
 Zu Spalte 14, 15 und 16
 Um eine Überlastung des Getriebes zu vermeiden, dürfen die genannten Grenzbelastungen nicht überschritten werden. Bei Umkehrbetrieb sind die Grenzbelastungswerte mit Faktor 0,75 zu multiplizieren.

¹⁾ Werte sind auf Motorwelle reduziert.
²⁾ Mitte des Wellenzapfens.
³⁾ Motorstrom muß auf den reduzierten Wert begrenzt werden.

Konstruktionsänderung vorbehalten.

Bild A1-2: Getriebegleichstrommotor als Lastmaschine

A1.3 Gleichstromantriebsmotor

maxon DC motor

F 2260
 Ø60 mm, Graphitbürsten, 80 Watt

Motordaten:

		Bestellnummern										
		2260, ...-51.216-200 (Wicklungsnummer einfügen)										
		Wicklungsnummer										
		880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890
1	Typenleistung	W	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
2	Nennspannung	Volt	15.0	15.0	18.0	24.0	24.0	24.0	36.0	36.0	48.0	48.0
3	Leerlaufdrehzahl	min ⁻¹	3980	2740	2650	2850	2640	2230	2690	2200	2670	2960
4	Anhaltmoment	Nm	2.88	1.97	1.91	2.06	1.87	1.67	2.01	1.59	1.94	1.69
5	Kennliniensteigung	min ⁻¹ mNm ⁻¹	1.44	1.45	1.43	1.42	1.45	1.37	1.36	1.41	1.40	1.42
6	Leerlaufstrom	mA	563	351	278	226	206	168	140	109	103	89.0
7	Anlaufstrom	A	83.8	39.4	30.6	26.3	22.2	16.7	16.1	10.4	11.5	8.87
8	Anschlusswiderstand	Ohm	0.179	0.381	0.589	0.911	1.08	1.44	2.24	3.47	4.18	5.41
9	Grenzdrehzahl	min ⁻¹	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
10	Max. Dauerbelastungsstrom	A	7.50	5.87	4.94	3.95	3.66	3.21	2.59	2.10	1.91	1.69
11	Max. Dauerdrehrmoment	mNm	258	294	303	309	309	321	324	322	324	332
12	Max. Abgabeleistung, bei Nennspannung	W	283	135	128	149	126	94.8	139	89.7	133	103
13	Max. Wirkungsgrad	%	79	78	79	80	79	79	81	79	81	80
14	Drehmomentkonstante	mNm A ⁻¹	34.4	50.1	62.6	78.3	84.5	100.0	125	153	169	191
15	Drehzahlkonstante	min ⁻¹ V ⁻¹	277	191	153	122	113	95.3	76.3	62.3	56.5	50.0
16	Mechanische Anlaufzeitkonstante	ms	20	20	19	19	19	18	18	18	18	18
17	Rotorträgheitsmoment	gcm ²	1330	1290	1270	1250	1230	1290	1270	1230	1230	1260
18	Anschlussinduktivität	mH	0.07	0.14	0.22	0.34	0.40	0.56	0.88	1.31	1.59	2.03
19	Therm. Widerstand Gehäuse-Luft	KW ⁻¹	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
20	Therm. Widerstand Rotor-Gehäuse	KW ⁻¹	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
21	Therm. Zeitkonstante der Wicklung	s	72	70	69	68	67	70	69	67	67	69

Betriebsbereiche

Legende Erläuterungen Seite 36

- Empfohlener Leistungsbereich
- Dauerbetriebsbereich unter Berücksichtigung der angegebenen thermischen Widerstände (Ziffer 19 und 20) und einer Umgebungstemperatur von 25°C wird bei dauerhafter Belastung die maximal zulässige Rotortemperatur erreicht. = thermische Grenze
- Kurzzeitbetrieb: Der Motor darf kurzzeitig und wiederkehrend überlastet werden.

Lagerprogramm

- Standardprogramm
- Sonderprogramm (auf Anfrage!)

- Axialspiel bei Axiallast < 15 N ≤ 0.1 mm > 15 N 0.1 - 0.5 mm
- Axialspiel für Motorkombinationen mit Encoder eingeschränkt auf max. 0.15 mm
- Vorspannte Kugellager: Vorspannkraft min. 15 N
- Max. Belastung der Kugellager: axial (dynamisch) 15 N, radial (5 mm ab Flansch) 100 N, Aufpressdruck (statisch) 400 N (statisch, Welle abgestützt) 10'000 N
- Radialspiel bei Kugellager: 0.05 mm
- Umgebungstemperatur: -20/+100°C
- Max. Rotortemperatur: +125°C
- Anzahl Kollektorsegmente: 26
- Motorgewicht: 1300 g
- Motordaten gemäss Tabelle sind Nenndaten. Toleranzdarstellung Seite 33. Detailliertere Angaben entnehmen Sie unseren Computerblättern.

maxon-Baukastensystem

Planetengetriebe
 Ø262 mm
 8-50 Nm
 Detail Seite 166

Digital-Encoder
 HP HEDS 5540
 500 Imp., 3 Kanal
 Detail Seite 177

Digital-Encoder
 HP HEDL 5540
 500 Imp., 3 Kanal
 Detail Seite 179

Digital-Encoder
 HP HEDS 6540
 1000 Imp., 3 Kanal
 Detail Seite 181

Bild A1-3: Gleichstrommotor als Antriebsmaschine

A1.4 RFH 630 RFID Lese- und Schreibgerät

SICK
Sensor Intelligence.

RFID
RFH6xx / RFH630 / Mid Range

Typ > [RFH630-1102101](#)
 Artikelnr. > [1054746](#)



Auf einen Blick

- 13,56-MHz-RFID-Schreib-/Lesegerät für Reichweiten bis 240 mm
- Transponderkommunikation entspricht ISO-15693-Standard
- Kompakte, industriegerechte Bauform mit integrierter Antenne
- Eingebundene Protokolle erlauben Zugang zur Standard-Feldbustechnik
- Leistungsfähiger Prozessor löst selbstständig Steuerungsaufgaben
- Flexible Triggersteuerung
- Unterstützt Parameter-Cloning mittels MicroSD-Speicherkarte
- Integrierte Diagnosefunktion

Ihr Nutzen

- Zuverlässige Identifikation garantiert maximalen Durchsatz
- Bereit für zukünftige Aufgaben, sichert nachhaltig Investitionen
- Einfache Integration spart Installationszeit
- Hohe Funktionalität ermöglicht flexible Lösungen
- Wartungsfrei
- Gleiche Anschluss- und Bedienoberfläche wie Barcodescanner und kamerabasierte Codeleser von SICK - kompatibel durch einheitliche IDpro-Plattform



Merkmale

Produktkategorie:	Schreib-/Lesegerät mit integrierter Antenne
Frequenzband:	HF (13,56 MHz)
Trägerfrequenz:	13,56 MHz
Version:	Mid Range
Ausgangsleistung:	1.000 mW
RFID-Standard:	ISO/IEC 15693, ISO/IEC 18000-3 "Mode 1"
Reichweite:	Max. 240 mm ¹⁾
Antenne:	Integriert, zusätzlicher Anschluss für externe Antenne
Weitere Funktionen:	Cloning-Funktion (MicroSD-Speicherkarte oder System), Diagnose, Firmware aktualisierbar, Flexibles Datenausgabeformat (frei parametrierbar), Heartbeat, Triggerung
Datenübertragungsrate:	26 kbit/s (Default)
Typische Zugriffszeiten:	1 Block lesen (32 bit/4 Byte): 13 ms 1 Block schreiben (32 bit/4 Byte): 16 ms 28 Blöcke lesen (896 bit/112 Byte): 64 ms 28 Blöcke schreiben (896 bit/112 Byte): 442 ms UID lesen (64 bit/8 Byte): 18 ms

RFID

© SICK AG. Irrtümer und Änderungen vorbehalten.

24.04.2014 14:07:31

Bild A1-4: RFH 630 RFID Lese- und Schreibgerät der Fa. SICK

A1.5 EDP Mini Handlingsystem



Handlingsysteme EDP mini

Mit dem EDP mini steht ein sehr kompaktes und mit 40 mm Baubreite sehr schlankes Handling zur Verfügung, welches wahlweise mit Linearmotoren oder pneumatisch angetrieben wird.

Das Linearmotorhandling ist bei kurzen Taktzeiten in den Punkten Wirtschaftlichkeit, Energieverbrauch, Wartungszyklen und Lebensdauer, allen pneumatischen Systemen weit überlegen. Einfachere Aufgabenstellungen mit weniger anspruchsvollen Zykluszeiten können auch mit den baugleichen pneumatischen Modulen EDM 20 P realisiert werden. Durch die geringe Baubreite von nur 40 mm benötigt das EDP mini wenig Platz. Das EDP mini wird betriebsbereit und komplett montiert ausgeliefert.

Vorteile:

- bis 120 Takte je Minute
- nur 40 mm breit
- bis 3 kg Nutzlast
- sehr hohe Lebensdauer
- geringer Energieverbrauch der Linearmotormodule
- CAD-Modelle durch den Handlingkonfigurator sofort verfügbar



Kombinationen	Bestellnummer
EDP mini xxxP/xxxP	113.0 ...
EDP mini xxxE/xxxP	113.1 ...
EDP mini xxxP/xxxE	113.2 ...
EDP mini xxxE/xxxE	113.3 ...

Bitte ergänzen Sie die Typbezeichnung und Bestellnummer wie folgt:
 xxx = max. Hub der Linearinheit in mm
 ... = Nummernergänzung für Standard-Peripherie

Standard-Peripherie	Nummernergänzung
ohne Peripherie	... 10
Greifer	
PG 20 ohne Sensoren	siehe Seite 125 ... 11
PG 20 mit Sensoren	siehe Seite 125 ... 12
Vakuum	
Vakuum ohne Abfrage	siehe Seite 70 ... 16
Vakuum mit Abfrage	siehe Seite 70 ... 16
Schwenkmodule mit Greifer	
CR 12	siehe Seite 111 ... 17
CR 12 + PG 20 ohne Sensoren	siehe Seite 111 siehe Seite 125 ... 18
DG 16 mit Sensoren	siehe Seite 117 ... 19

Technische Daten	EDM 20 P	EDM 20 EL	
	Antriebsart	pneumatisch	elektrisch, Linearmotor
Hub horizontal (Y)	50, 100 mm	50 mm	100, 200, 300 mm
Hub vertikal (Z)	50, 100 mm	50 mm	100, 200, 300 mm
max. Geschwindigkeit	1,5 m/s	6,8 m/s	4,8 m/s
Spitzenkraft	180 N	67 N	137 N
Permanenterkraft	180 N	15 N	31 N
Wiederholgenauigkeit	± 0,05 mm	± 0,05 mm	± 0,05 mm
· mit externem Wegmesssystem (5 µm)	-	± 0,02 mm	± 0,02 mm
Steuerblock mit 5/3, 5/2 oder Vakuumeinheiten	bis 6 Ventile	bis 6 Ventile	bis 6 Ventile

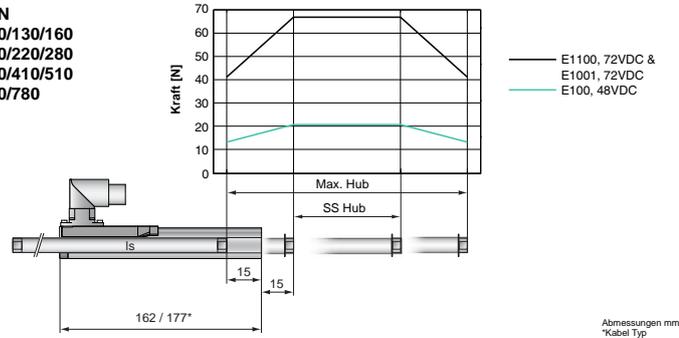
Nutzlast (zentrisch)				
Hub Y Hub Z	50 mm	100 mm	200 mm	300 mm
50 mm	3 kg	3 kg	2 kg	1 kg
100 mm	3 kg	2 kg	1 kg	0,5 kg
200 mm	2 kg	1 kg	-	-
300 mm	1 kg	-	-	-

Bild A1-5: Handlingsystem EDP Mini der Fa. eps

A1.6 EDP Mini Handlingsystem - z-Linearachse

P01-23x80F-HP LinMot®

Spitzenkraft: 67N
Maximaler Hub: 100/130/160
 200/220/280
 350/410/510
 690/780



Motor Spezifikation

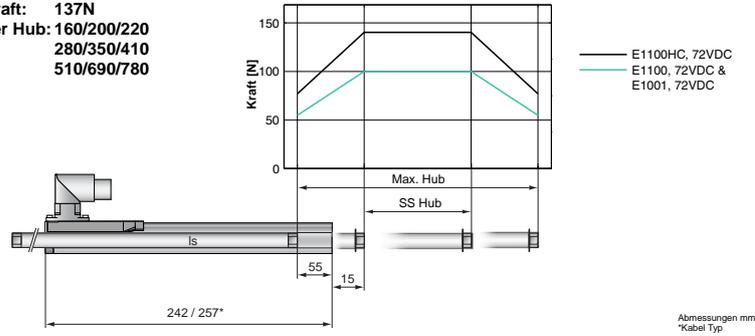
	P01-	Stecker Typ						Kabel Typ					
		23x80F-HP-R						23x80F-HP-R20					
Erweiterter Hub ES	mm (in)	100	130	160	200	220	280	350	410	510	690	780	
Standard Hub SS	mm (in)	40	70	100	140	160	220	290	350	450	630	720	
Spitzenkraft E1100/E1001	N (lbf)							67 (15.1)					
Spitzenkraft E100	N (lbf)							21 (4.7)					
Kont. Kraft	N (lbf)							15 (3.5)					
Kont. Kraft mit Lüfter	N (lbf)							25 (5.6)					
Randkraft	%							63					
Kraftkonstante	N/A (lbf/A)							9 (2.0)					
Max. Strom @ 72VDC	A							7.5					
Max. Strom @ 48VDC	A							7.5					
Max. Gesch. @ 72VDC	m/s (in/s)							7.3 (287)					
Max. Gesch. @ 48VDC	m/s (in/s)							4.9 (193)					
Phasenwider. 25/110 °C	Ohm							4.2/5.5					
Phaseninduktivität	mH							0.6					
Therm. Widerstand	*K/W							5.6					
Therm. Zeitkonstante	sec							1600					
Statordurchmesser	mm (in)							23 (0.91)					
Statorlänge	mm (in)							162/177* (6.38/6.97*)					
Statormasse	g (lb)							265 (0.58)					
Läuferdurchmesser	mm (in)							12 (0.47)					
Läuferlänge	mm (in)	170	200	230	270	290	350	420	480	580	760	850	
Läufermasse	g (lb)	125	150	175	210	230	280	340	390	475	625	700	
Wiederholgenauigkeit	mm (in)							±0.05 (±0.0020)					
Linearität	%							±0.1					
Wiederholgen. mit EPS	mm (in)							±0.01 (±0.0004)					
Linearität mit EPS	mm (in)							±0.01 (±0.0004)					

Bild A1-6: Linearachse in z-Richtung des EDP Mini der Fa. eps

A1.7 EDP Mini Handlingsystem - y-Linearachse

P01-23x160H-HP **LinMot®**

Spitzenkraft: 137N
Maximaler Hub: 160/200/220
 280/350/410
 510/690/780



Motor Spezifikation

	P01-	Stecker Typ					Kabel Typ				
		23x160H-HP-R					23x160H-HP-R20				
Erweiterter Hub ES	mm (in)	160	200	220	280	350	410	510	690	780	
Standard Hub SS	mm (in)	20	60	80	140	210	270	370	550	640	
Spitzenkraft E1100 - HC	N (lbf)						137	(30.8)			
Spitzenkraft E1100 / E1001	N (lbf)						100	(22.5)			
Kont. Kraft	N (lbf)						31	(7.0)			
Kont. Kraft mit Lüfter	N (lbf)						48	(10.7)			
Randkraft	%						56				
Kraftkonstante	N/A (lbf/A)						12.5	(2.81)			
Max. Strom @ 72VDC	A						11				
Max. Strom @ 48VDC	A						10				
Max. Gesch. @ 72VDC	m/s (in/s)						5.3	(208)			
Max. Gesch. @ 48VDC	m/s (in/s)						3.5	(138)			
Phasenwider. 25/110 °C	Ohm						3.8/5.1				
Phaseninduktivität	mH						0.54				
Therm. Widerstand	*K/W						2.7				
Therm. Zeitkonstante	sec						1300				
Statordurchmesser	mm (in)						23	(0.91)			
Statorlänge	mm (in)						242/257*	(9.53/10.12*)			
Statormasse	g (lb)						450	(0.99)			
Läuferdurchmesser	mm (in)						12	(0.47)			
Läuferlänge	mm (in)	230	270	290	350	420	480	580	760	850	
Läufermasse	g (lb)	175	210	230	280	340	390	475	625	700	
Wiederholgenauigkeit	mm (in)						±0.05	(±0.0020)			
Linearität	%						±0.1				
Wiederholgen. mit EPS	mm (in)						±0.01	(±0.0004)			
Linearität mit EPS	mm (in)						±0.01	(±0.0004)			

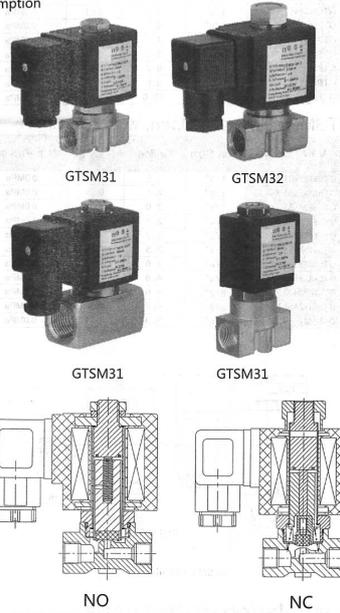
Bild A1-7: Linearachse in z-Richtung des EDP Mini der Fa. eps

A1.8 Abfüllventile (1/2)

GTSM31/32Series Direct Acting 1/8—1/2 2W NC/NO

Characteristic: 1.Direct acting miniature construction at low power consumption
2.Compact design to save the space

- Medium:** Air, Water, Steam, Oil, etc
- Temperature:** NBR Seal: -10 to 80
EPDM Seal: -30 to 120
PEFT Seal : -60 to 200
VITON Seal : -30 to 150
- Pressure:** GTSM31: 0.0MPa~ 1.6MPa
GTSM32: 0.0MPa~ 1.6MPa
- Port Size:** 1/8", 1/4", 3/8", 1/2"
- Port Thread:** BSPP, BSPT, NPT
- Orifice(mm):** 1.6, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0
- Voltage:** DC- 12V, 24V, 36V
AC- 24V, 120V, 240V/60Hz, 110V, 220V/50Hz
- Tolerance:** +/-10%
- Coins:** EX1620, 20VA(AC), 16W(DC), IP65, 100%ED
- Material:** Body- Brass or Stainless Steel
Seal- VITON, NBR, EPDM, PTFE
Armature Tube - Stainless Steel 304
Plunger - Stainless Steel 430F
Stop - Stainless Steel 430F
Springs - SS304
Shading Rings- Stainless Steel 304



Determine Valve Body Code

Type	Orifice mm	Port size	Port Thread	Body	Seal	Coils	Voltage
GTSM31 GTSM32	16-1.6 45-4.5 25-2.5 50-5.0 30-3.0 60-6.0 35-3.5 80-8.0 40-4.0 10-10.0	1-1/8" 2-1/4" 3-3/8" 4-1/2"	G-G/BSPP N-NPT Thread	B-Brass S-Stainless Steel	N-NBR E-EPDM Seal V-VITON Seal	S21B S91B NASS 0543	1. AC220V 2. DC24V 3. AC110V 4. DC12V 5. AC24V 6. DC6V 7. DC36V

EXAMPLE: GTSM32 30 1 GBV S91B1, GTSM32 SERIES, N.O., 3.0MM ORIFICE, 1/8"G, BRASS BODY, VITON SEAL, COIL S91B, AC220V, DIN

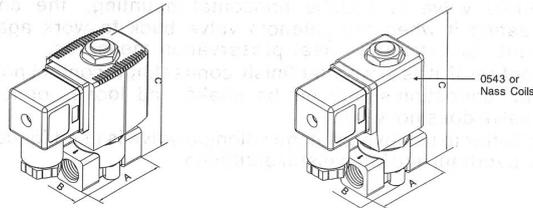


Bild A1-8: Abfüllventile für das Paraffin und die Wachsfarben

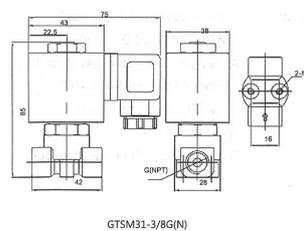
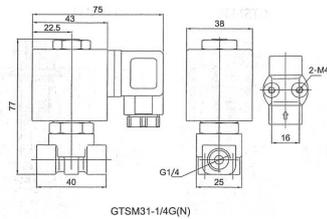
A1.9 Abfüllventile (2/2)

GTSM31 Normally Closed, with coil S91B

Valve Body	Port Size	Orifice	Cv	Min Pressure	Max Pressure		SealsMaterial	BodyMaterial	Coil
					AC(22VA)	DC(17W)			
GTSM31161X X X X	1/8"	1.6	0.11	0.0MPa	1.6MPa	1.6MPa	NBR, EPDM, PTFE or VITON.	Brass, or Stainless Steel	S91B
GTSM31251 X X X X	1/8"	2.5	0.18	0.0MPa	1.2MPa	1.2MPa			S91B
GTSM31301X X X X	1/8"	3.0	0.3	0.0MPa	1.0MPa	1.0MPa			S91B
GTSM31252 X X X X	1/4"	2.5	0.18	0.0MPa	1.2MPa	1.2MPa			S91B
GTSM31302 X X X X	1/4"	3.0	0.3	0.0MPa	1.0MPa	1.0MPa			S91B
GTSM31352 X X X X	1/4"	3.5	0.34	0.0MPa	0.8MPa	0.8MPa			S91B
GTSM31402 X X X X	1/4"	4.0	0.5	0.0MPa	0.6MPa	0.6MPa			S91B
GTSM31452X X X X	1/4"	4.5	0.61	0.0MPa	0.4MPa	0.4MPa			S91B
GTSM31403 X X X X	3/8"	4.0	0.5	0.0MPa	0.8MPa	0.8MPa			S91B
GTSM31453 X X X X	3/8"	4.5	0.61	0.0MPa	0.4MPa	0.4MPa			S91B
GTSM31503 X X X X	3/8"	5.0	0.71	0.0MPa	0.3MPa	0.3MPa			S91B
GTSM31603X X X X	3/8"	6.0	0.80	0.0MPa	0.3MPa	0.3MPa			S91B
GTSM31803X X X X	3/8"	8.0	1.24	0.0MPa	0.1MPa	0.1MPa			S91B
GTSM3114X X X X	1/2"	10.0	1.72	0.0MPa	0.1MPa	0.1MPa			S91B

GTSM32 Normally Open, with Coil S91B

Valve Body	Port Size	Orifice	Cv	Min Pressure	Max Pressure		SealsMaterial	BodyMaterial	Coil
					AC(22VA)	DC(17W)			
GTSM32161 X X X X	1/8"	1.6	0.11	0.0MPa	1.6MPa	1.6MPa	NBR, EPDM, PTFE or VITON.	Brass, or Stainless Steel	S91B
GTSM32251 X X X X	1/8"	2.5	0.18	0.0MPa	1.4MPa	1.4MPa			S91B
GTSM32301 X X X X	1/8"	3.0	0.3	0.0MPa	1.2MPa	1.2MPa			S91B
GTSM32252 X X X X	1/4"	2.5	0.18	0.0MPa	1.4MPa	1.4MPa			S91B
GTSM32302 X X X X	1/4"	3.0	0.3	0.0MPa	1.2MPa	1.2MPa			S91B
GTSM32352 X X X X	1/4"	3.5	0.34	0.0MPa	0.9MPa	0.9MPa			S91B
GTSM32402 X X X X	1/4"	4.0	0.5	0.0MPa	0.7MPa	0.7MPa			S91B
GTSM32452 X X X X	1/4"	4.5	0.61	0.0MPa	0.5MPa	0.5MPa			S91B
GTSM32403 X X X X	3/8"	4.0	0.5	0.0MPa	0.7MPa	0.7MPa			S91B
GTSM32453 X X X X	3/8"	4.5	0.61	0.0MPa	0.5MPa	0.5MPa			S91B
GTSM32503 X X X X	3/8"	5.0	0.71	0.0MPa	0.5MPa	0.5MPa			S91B



Installation instructions:

1. Please refer to the operating instruction of the product before installation to confirm it is the one that meet your requirement.
2. Piping should be cleaned before use, please install filter if your medium is not clean to prevent the impurities do harm to the normal operation of the solenoid valve.
3. Solenoid valve is generally one-way work, can't be anti loaded, the arrow of the valve should bring into correspondence with the movement direction of the fluid.
4. The solenoid valve is usually horizontal mounting, the coil is vertical.
5. Please heating it when the solenoid valve back to work again in freezing environment, or set up the heat preservation measures.
6. Please confirm if it is firm after finish connecting, contact point of electrical component connection should not be shake and loose, or it will cause the solenoid valve does not work.
7. It is much better to use bypass if the solenoid valve is used for continuous work in favor of overhaul and successful production.

Bild A1-9: Abfüllventile für das Paraffin und die Wachsfarben