

FAU Studien aus dem Maschinenbau 346

**Toni Donhauser**

Ressourcenorientierte  
Auftragsregelung in einer  
hybriden Produktion mittels  
betriebsbegleitender Simulation



Toni Donhauser

Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer  
hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation

# **FAU Studien aus dem Maschinenbau**

## **Band 346**

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Toni Donhauser

**Ressourcenorientierte  
Auftragsregelung in einer  
hybriden Produktion mittels  
betriebsbegleitender Simulation**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung  
und Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen

FAU University Press

2020

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

Bitte zitieren als

Donhauser, Toni. 2020. *Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer  
hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation.*

FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 346.

Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-317-5.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.  
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.  
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:  
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-316-8 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-96147-317-5 (Online-Ausgabe)

ISSN: 2625-9974

DOI: 10.25593/978-3-96147-317-5

**Ressourcenorientierte Auftragsregelung  
in einer hybriden Produktion  
mittels betriebsbegleitender Simulation**

Der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

zur

Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

M.Sc. Toni Donhauser

aus Amberg

Als Dissertation genehmigt  
von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen

Prüfung: 19. Dezember 2019

Vorsitzender  
des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil.  
Andreas Paul Fröba

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke  
Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel,  
Universität Kassel  
Prof. Dr. rer. pol. Peter Schuderer,  
TH Ingolstadt

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Jörg Franke für die Möglichkeit der Promotion, sein stets offenes Ohr, die zugleich fordernden wie wertvollen Anregungen und die außerordentlich hohe Loyalität gegenüber allen Mitarbeitern. Er ist mir besonders in der analytischen Arbeitsweise und Beharrlichkeit im Diskurs ein großes Vorbild.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Peter Schuderer, der all meine Ideen und Vorhaben guthieß und ohne zu zögern dafür eingetreten ist. Zudem gab er mir die Möglichkeit, meinen Horizont in Industrieprojekten zu erweitern, mich durch die eigenverantwortliche Durchführung weiterzuentwickeln und wertvolle Erkenntnisse für die Forschungsarbeit mitzunehmen.

Frau Prof. Dr. Sigrid Wenzel danke ich für die frühzeitige Wertschätzung meiner Forschungsarbeit sowie die bereitwillige Anfertigung des Gutachtens ebenso wie Herrn Prof. Dr. Ulrich Rüde als weiteres Mitglied des Prüfungsausschusses. Zudem war es mir eine große Ehre, Herrn Prof. Dr. Klaus Feldmann für den Prüfungsvorsitz gewinnen zu können.

Stellvertretend für die Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. möchte ich Herrn Dr. Wolfgang Eden für die stets angenehme Zusammenarbeit danken. Ein großer Dank gebührt auch meinen Kollegen, insbesondere Tobias Rackow, Michael Scholz, Matthias Brossog, Lukas Baier, Andreas Blank und Dominik Kisskalt, die mir nicht nur durch den fachlichen Austausch die Arbeit erleichtert, sondern auch meinen Arbeitsalltag bereichert haben.

Allen voran danke ich abschließend meinen Eltern Karin und Toni, die mir alle Entwicklungsmöglichkeiten gewährt und die erforderlichen Werte für einen erfolgreichen Abschluss der Promotion vermittelt haben, dass sie immer an mich geglaubt und mir jederzeit den Rücken freigehalten haben. Gleichermäßen gilt der Dank meiner Frau Anna und meinem Sohn Anton für all ihre Entbehrungen, fachlichen Ratschläge und die Aufmunterungen, wenn die Dissertation wieder einmal am Nervenkostüm nagte.

Nürnberg, im Dezember 2019

Toni Donhauser



# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	iii
Abkürzungsverzeichnis .....	ix
Bildverzeichnis .....	xiii
Tabellenverzeichnis .....	xix
<b>1 Simulationsbasierte Regelung von Fertigungsabläufen .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Identifikation von Handlungsbedarfen in der betriebsbegleitenden simulationsgestützten Optimierung .....</b>	<b>7</b>
2.1 Herstellung von Kalksandsteinen .....	7
2.1.1 Fertigungsprozesse und Materialflüsse bei der Kalksandsteinherstellung .....	8
2.1.2 Informationsflüsse zur Steuerung der Materialströme .....	17
2.1.3 Klassifizierung des Prozesses .....	21
2.1.4 Zukunftsfähigkeit und Handlungsbedarf .....	26
2.2 Optimierungsverfahren für die Steuerung von Produktionsabläufen .....	27
2.2.1 Evolution der Produktionsplanung und -steuerung .....	28
2.2.2 Verfahren zur Absatzplanung als Basis für die Planung des Produktionsprogramms .....	34
2.2.3 Scheduling-Probleme zur simultanen Mengen-, Termin-, Kapazitäts- und Reihenfolgeplanung .....	37
2.2.4 Exakte Algorithmen und heuristische Optimierungsmethoden .....	41
2.2.5 Simulationsgestützte Optimierung .....	43
2.3 Simulation zur effizienten Steuerung von Produktionsabläufen .....	44
2.3.1 Simulationsmethoden in der Wertstromoptimierung .....	45
2.3.2 Modellerstellung für ereignisdiskrete Materialflusssimulationen .....	47
2.3.3 Einsatzvarianten für Materialflusssimulationen .....	49
2.3.4 Betriebsbegleitende Simulation .....	50
2.3.5 Ansätze zum Einbezug von Energieverbräuchen in Materialflusssimulationen .....	53
2.4 Unternehmensweite Datenintegration .....	55
2.4.1 Wandel der Automatisierung im Kontext von Industrie 4.0 ...	55
2.4.2 Standards und Hürden der Betriebs- und Maschinendatenerfassung .....	58
2.4.3 OPC UA als Kommunikationsstandard in der Produktion .....	60

2.4.4	Überwachung von Fertigungsprozessen durch Data Analytics .....	62
2.5	Ableitung des Forschungsbedarfs unter Abgrenzung bestehender Forschungsansätze .....	66
<b>3</b>	<b>Effiziente Simulationsmodelle als operatives Werkzeug zur Identifikation und Bewertung von Verbesserungspotenzialen .....</b>	<b>75</b>
3.1	Modellierung der Materialflüsse in Kalksandsteinwerken zur ereignisdiskreten Simulation .....	75
3.1.1	Einsatzmöglichkeiten der Materialflusssimulation im Kalksandsteinwerk .....	76
3.1.2	Abbildung des Produktionsprozesses in einem generischen Baukasten-Modell .....	79
3.1.3	Integrierte Modellierung von Schüttgut und Stückgut in einer ereignisdiskreten Simulation .....	84
3.1.4	Anforderungsdefinition für die Härteprozessmodellierung ....	88
3.2	Energieflüsse im Herstellungsprozess für Kalksandsteine .....	91
3.2.1	Integration elektrischer Energieverbräuche anhand von Lastprofilen .....	91
3.2.2	Modellierung des thermischen Verhaltens der Werkstoffe vor dem Härteprozess .....	97
3.3	Physikalische Modellierung der thermodynamischen Wechselwirkungen beim Härteprozess .....	101
3.3.1	Grundlegende thermodynamische Zusammenhänge im Härteprozess .....	102
3.3.2	Temperatur- und Druckanstieg während der Aufheizphase ..	105
3.3.3	Druckregelung während der Halte- und Restdampfphase .....	109
3.3.4	Dampfabgabe während der Abkühlungsphase .....	113
<b>4</b>	<b>Verfahren zur automatisierten Generierung optimierter Fertigungsabläufe mittels Kopplung von Algorithmen und Simulationsmodellen .....</b>	<b>119</b>
4.1	Ganzheitliche simulationsgestützte Optimierung der Auftragssteuerung in der Kalksandsteinherstellung .....	119
4.1.1	Ziele und Komplexitätstreiber im Zusammenwirken der Prozessschritte .....	120
4.1.2	Dekompositionsverfahren zur Lösung des ganzheitlichen Problems .....	121
4.1.3	Ganzheitliches Lösungskonzept auf Basis der Dekomposition .....	125

4.2	Verfahren zur Ermittlung optimaler Losgrößen und zur Reihenfolgeplanung .....	128
4.2.1	Methodik zur Absatzplanung in KS-Werken .....	129
4.2.2	Optimierungsmodell zur Losgrößenoptimierung und Reihenfolgeplanung .....	133
4.2.3	Zugeschnittene Lösungsheuristik .....	137
4.3	Simulationsgestützte Optimierung der Autoklavenbeladung .....	138
4.3.1	Optimierungsansätze und Ziele .....	139
4.3.2	Lösungsverfahren .....	141
4.4	Zielgerechte Anpassung der initialen und abschließenden Produktionsstufen an die optimierten Hauptprozesse .....	145
4.4.1	Kapazitätsprüfung für den Verpackungsbereich .....	145
4.4.2	Rückwärtsterminierung der Mischaufträge .....	146
<b>5</b>	<b>Methodik zur ressourceneffizienten Regelung der Produktionsprozesse durch betriebsbegleitende simulationsgestützte Optimierung.....</b>	<b>149</b>
5.1	Regelungsmethodik zur vorausschauenden Reaktion auf Planabweichungen .....	150
5.1.1	Ablauf der Fertigungsregelung auf Basis betriebsbegleitender simulationsgestützter Optimierung .....	150
5.1.2	Identifizierung kritischer Planabweichungen .....	153
5.1.3	Voraussimulation zur Initialisierung des Optimierungsmodells mit künftig vorliegenden Produktionszuständen .....	154
5.1.4	Optimierung, Bewertung und regelnder Eingriff auf die Fertigungsabläufe .....	156
5.2	Echtzeitnahe digitale Abbildung der Produktion durch Integration relevanter Betriebs- und Maschinendaten .....	158
5.2.1	Konzipierung der Erfassung und Bereitstellung relevanter Daten .....	159
5.2.2	Technische Anbindung des KS-Cockpit an Automatisierungssysteme .....	161
5.2.3	Implementierung des betriebsbegleitenden Simulationsmodells .....	163
5.3	Implementierung der Methodik zur simulationsgestützten Fertigungsregelung .....	169
5.3.1	Aufbaustruktur des KS-Cockpit aus einzelnen Komponenten .....	169
5.3.2	Kommunikation zwischen den Komponenten des KS-Cockpit .....	171

<b>6</b>	<b>Validierung und Umsetzung des Gesamtsystems .....</b>	<b>175</b>
6.1	Evaluierung der Simulationsmodellierung.....	175
6.2	Bewertung der Eignung der Optimierungsverfahren.....	179
6.3	Validierung der Methodik zur simulationsbasierten Fertigungsregelung .....	180
6.4	Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auf andere Anwendungen .....	184
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>187</b>
<b>8</b>	<b>Summary and Outlook .....</b>	<b>191</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>195</b>

## Abkürzungsverzeichnis

ACF	Autocorrelation Function ( <i>Autokorrelationsfunktion</i> )
AIC	Akaike Information Criterion ( <i>Akaike-Informationskriterium</i> )
AK	Autoklav
APS	Advanced Planning and Scheduling
BDE	Betriebsdatenerfassung
BE	Bewegliches Element
BIC	Bayesian Information Criterion ( <i>Bayessches Informationskriterium</i> )
BZ	Betriebszustand
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFK	Carbonfaser-verstärkter Kunststoff
CIM	Computer Integrated Manufacturing
COM	Component Object Model
CP(P)S	Cyber- <b>p</b> hysisches ( <b>P</b> roduktions-) <b>S</b> ystem
CPU	Central Processing Unit
CRM	Customer Relationship Management
CSH	Calcium-Silikat-Hydrat
DES	Discrete Event Simulation ( <i>Ereignisdiskrete Simulation</i> )
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DoE	Design of Experiments
DSS	Decision Support System (Entscheidungsunterstützungssystem)
EN	Europäische Norm
engl.	<b>englisch</b>
ERP	Enterprise Resource Planning

FAPS	Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FIFO	First in – first out
GLSPPLB	General lotsizing and scheduling problem with parallel lines and backloging
GUI	Graphical User Interface ( <i>Grafische Benutzeroberfläche</i> )
HiL	Hardware-in-the-loop
HMI	Human Machine Interface ( <i>Mensch-Maschine-Schnittstelle</i> )
i. A. a.	in Anlehnung an
I4.0	Industrie 4.0
IH	Instandhaltung
IoT	Internet of Things and Services ( <i>Internet der Dinge und Dienste</i> )
IT	Informationstechnologie
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KS	Kalksandstein
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System ( <i>Produktionsleitsystem</i> )
MRP	Material Requirements Planning ( <i>Materialbedarfsplanung</i> )
MRP II	Manufacturing Resource Planning
NP	Nichdeterministisch polynomial
ODBC	Open Database Connectivity
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PACF	Partial Autocorrelation Function ( <i>partielle Autokorrelationsfunktion</i> )
PDM	Produktdatenmanagement
PLM	Produktlebenszyklusmanagement
PPR	Produkt-Prozess-Ressource

PPS	<b>Produktionsplanung und -steuerung</b>
QS	<b>Qualitätssicherung</b>
RAMI 4.0	<b>Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0</b>
SCADA	<b>Supervisory Control and Data Acquisition</b>
SCM	<b>Supply Chain Management</b>
SiL	<b>Software-in-the-loop</b>
SOA	<b>Serviceorientierte Architektur</b>
SPS	<b>Speicherprogrammierbare Steuerung</b>
UML	<b>Unified Modelling Language</b>
VDI	<b>Verein Deutscher Ingenieure e. V.</b>
VDMA	<b>Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau</b>
WIP	<b>Work-in-process</b> ( <i>laufende Arbeiten</i> )
WMS	<b>Warehouse Management System</b>
XML	<b>Extensible Markup Language</b>
ZFE	<b>Zielfunktionsergebnis</b>



## Bildverzeichnis

Bild 1: Methodik zur Erreichung einer Fertigungsregelung unter Einsatz der Simulation als Hauptkomponente .....	2
Bild 2: Zusammenhang der Kapitel in der vorliegenden Arbeit .....	5
Bild 3: Allgemeiner Herstellungsprozess für Kalksandsteine .....	8
Bild 4: Massefluss in Reaktoren mit und ohne Austragsvorrichtung .....	11
Bild 5: Layout und Materialfluss des Pressenbereichs (Ansicht von oben) .....	12
Bild 6: Reale Härtekurve für die Autoklavierung in einem KS-Werk.....	13
Bild 7: Fließschema der Dampf- und Wasserströme im Härteprozess i. A. a. [18].....	14
Bild 8: Informationsfluss zur Koordinierung der Herstellungsprozesse von KS .....	18
Bild 9: Charakterisierung der KS-Produktion nach [26] im Vergleich zu anderen Industriezweigen mit ähnlichen Herstellprozessen .....	23
Bild 10: Vergleich ähnlicher Prozessketten aus verwandten Branchen.....	24
Bild 11: Wechselwirkungen zwischen Produktionszielen in KS-Unternehmen.....	27
Bild 12: Aufgaben der PPS nach dem Aachener Modell i. A. a. [51] .....	30
Bild 13: Hauptfunktionen der Produktionssteuerung nach [52, 53] .....	31
Bild 14: Gängige Prognoseverfahren zur Absatzplanung nach [77-82].....	35
Bild 15: Interdependenzen zwischen Planungsebenen der PPS i. A. a. [89] .....	38
Bild 16: Klassifizierung von Scheduling-Problemen nach Graham et al. [100] (Darstellung i. A. a. Pinedo [96]) .....	39
Bild 17: Kategorisierung von Modellierungsansätzen zur Ablauf- und Losgrößenplanung (i. A. a. [101-104]).....	40
Bild 18: Spezifische Periodeneinteilungen für einstufige, dynamische Mehr-Produkt-Modelle zur Ablauf- und Losgrößenplanung [105-112] .....	41
Bild 19: Kategorisierung der simulationsgestützten Optimierungsverfahren gemäß der Verknüpfung von Simulation und Optimierung (i. A. a. [129]) .....	43
Bild 20: Einsatzbereiche verschiedener Simulationsarten .....	46
Bild 21: Vorgehensweise zur Durchführung von Simulationsstudien i. A. a. [134, 146].....	47

Bild 22: Aufbau und Einsatzweise der Bausteinbibliothek i. A. a. Kudlich [147] .....	48
Bild 23: Operative Einsatzmöglichkeiten der DES i. A. a. [134] .....	49
Bild 24: Bereitstellung erforderlicher Daten für betriebsbegleitende Materialflusssimulationen über konventionelle Automatisierungssysteme i. A. a. [149, 162, 163].....	51
Bild 25: Varianten zur Einbindung des energetischen Verhaltens von Produktionssystemen in ereignisdiskrete Materialflusssimulationen .....	53
Bild 26: Auflösung der Automatisierungspyramide i. A. a. [199].....	56
Bild 27: Verwendung des digitalen Schattens gemäß den Umsetzungsempfehlungen der Industrie 4.0 i. A. a. [1, P6] .....	58
Bild 28: Generierung eines digitalen Zwillings nach [208, 210] .....	59
Bild 29: Beispielarchitektur zur direkten Datenbereitstellung aus der Feldebene unter Nutzung eingebetteter OPC-UA-Server in Automatisierungskomponenten .....	62
Bild 30: Evolution der Instandhaltungsstrategien i. A. a. Mühlnickel et al. [245].....	64
Bild 31: Modell des Abnutzungsvorrats i. A. a. [250, 251] .....	64
Bild 32: Elementarer Aufbau eines Diagnosesystems i. A. a. [252] .....	65
Bild 33: Hauptbestandteile der Methodik zur simulationsgestützten Auftragsregelung .....	68
Bild 34: Referenzprozess der KS-Herstellung zur generischen, bausteinbasierten DES-Modellerstellung.....	80
Bild 35: Aufbaustruktur des DES-Referenzmodells.....	81
Bild 36: Ablauf des Auftragsmanagements in der Simulation als Flussdiagramm.....	83
Bild 37: Varianten der Schüttgutmodellierung in DES .....	85
Bild 38: Transportkonzept für Schüttgut in DES .....	87
Bild 39: Einflussfaktoren auf den Autoklavierungsprozess.....	88
Bild 40: Soll-Härtekurve ohne Berücksichtigung energetischer Einsparpotenziale .....	89
Bild 41: Methodik zur Integration elektrischer Energieverbräuche in DES .....	92
Bild 42: Anpassung von Lastprofilen bei variierenden zeitbezogenen Prozessparametern .....	96
Bild 43: Implementierung der Berechnungsfunktionalität für variantenabhängige, elektrische Energieverbräuche in einem DES-Modell .....	96

Bild 44: Betrachtungsbereich für die Integration des thermischen Verhaltens der Materialflusselemente in der DES .....	97
Bild 45: Vorgehensweise zur Integration des thermischen Verhaltens von Materialflusselementen in der Simulation von KS-Werken .....	99
Bild 46: Implementierung der Berechnungsfunktionalität für thermische Energieflüsse in den Materialflusselementen vor dem Härteprozess im DES-Modell.....	101
Bild 47: Komponenten eines Autoklavs im Härteprozess i. A. a. [18] .....	102
Bild 48: Unterteilung der Berechnungsmethodik für die Bearbeitungszeit in den Autoklaven in einzelne Berechnungsphasen ....	103
Bild 49: Charakterisierung der Trennstellen der Berechnungsmethodik für den Härteprozess anhand eines exemplarischen Härtevorgangs.....	103
Bild 50: Logik zur Festlegung eines Überleitpaares als Flussdiagramm...	105
Bild 51: Berechnung der mittleren Temperatur $\bar{T}$ des Kesselinneren aus einer aufgezeichneten realen Härtekurve während der Abkühlungsphase .....	111
Bild 52: Empirischer Temperaturverlauf zweier Autoklaven in Abhängigkeit der Türöffnung von Trennstelle (13) bis (1) .....	115
Bild 53: Implementierung der thermischen Energieflüsse im Härteprozess .....	116
Bild 54: Teilziele und Komplexitätstreiber der einzelnen KS-Produktionsschritte .....	120
Bild 55: Dekomposition der KS-Produktion in vier Subsysteme .....	124
Bild 56: Sukzessive und rekursive Zusammenführung der Teilprobleme (Subsysteme) zur ganzheitlichen simulationsgestützten Optimierung des Produktionssystems .....	126
Bild 57: Implementierung der Verknüpfung der Subsysteme unter Anwendung von simulationsgestützten Optimierungsverfahren .....	127
Bild 58: Mehrstufige Vertriebsstruktur für Kalksandsteine .....	129
Bild 59: Exemplarische Anwendung eines SARIMA-Modells auf eine Absatzkurve einer KS-Sorte mit Trend und Saisonalität .....	131
Bild 60: Umgang mit C-Gütern in der Reihenfolgeplanung .....	132
Bild 61: Erweiterung des GLSP nach Fleischmann/Meyr [60] zur Verwendung in KS-Werken .....	134
Bild 62: Ablauf des simulationsgestützten Optimierungsverfahrens zur Ermittlung der optimalen Autoklavenzuweisung .....	142

Bild 63: Exemplarischer Suchverlauf von Algorithmus 1 zur Bestimmung der optimalen Überleitgrenze .....	143
Bild 64: Methodik zur Identifizierung einer Optimallösung in Subsystem 3 .....	146
Bild 65: Gegenüberstellung von Rückwärts- und Vorwärtsterminierung der Mischaufträge .....	147
Bild 66: Eliminierung der Nachteile gängiger Rescheduling-Ansätze durch Integration von Simulationsverfahren .....	151
Bild 67: Periodisch-reaktiver Einsatz von Simulations- und Optimierungsverfahren zum vorausschauenden Entgegenwirken bei Planabweichungen (i. A. a. [P6]) .....	152
Bild 68: Nutzen der Voraussimulation illustriert anhand eines Fallbeispiels.....	155
Bild 69: Entscheidungskriterien für die Durchführung des Reschedulings .....	157
Bild 70: Direkter Eingriff auf den SPS-Ablauf aus der Simulation über OPC UA.....	158
Bild 71: Konzept zur Erweiterung der Materialflusssimulation zu einem produktionssynchronen digitalen Zwilling des Materialflusses....	158
Bild 72: Erforderliche Echtzeitdaten für die betriebsbegleitende Simulation.....	159
Bild 73: Ableitung und Integration der erforderlichen Daten für die betriebsbegleitende Simulation .....	159
Bild 74: Zu erfassende Daten für den betriebsbegleitenden Einsatz (Pressen) .....	161
Bild 75: Alternativen zum Echtzeitdatentransfer zwischen SPS und Simulation.....	162
Bild 76: Einrichtung der Datenverbindung über eine OPC-UA-Schnittstelle .....	163
Bild 77: Zeithorizont für die dynamische Einschleusung am letzten Meldepunkt.....	164
Bild 78: Lückenhafte Materialverfolgung im Pressenbereich .....	165
Bild 79: Mindestumfang eines Informationsmodells zur betriebsbegleitenden Simulation .....	166
Bild 80: Vorgehensmodell für die Erstellung des OPC-UA- Informationsmodells .....	167
Bild 81: Gliederung der Objekte-Hierarchie in fünf Ebenen am Beispiel des Netzwerks „Rohstoffe“ .....	167

Bild 82: Aufbau der Objekttypen am Beispiel einer KS-Pressen.....	168
Bild 83: Zusammenwirken der Komponenten des KS-Cockpit (i. A. a. [P6]).....	169
Bild 84: Komponentenstruktur des simulationsgestützten Optimierungsmoduls .....	170
Bild 85: Zusammenwirken der Komponenten des Optimierungsmasters (i. A. a. [P6]).....	171
Bild 86: Kommunikationsstruktur zwischen den Komponenten des KS-Cockpits (i. A. a. [P6]).....	172
Bild 87: Spezifisches DES-Modell eines KS-Werks auf Basis des Baukastens .....	176
Bild 88: Fertigungsaufträge als Validierungsgrundlage (links) sowie Zeitpunkte der Ankunft des jeweils letzten Steinpakets eines Auftrags als Validierungsergebnis (rechts).....	176
Bild 89: Teilmodell der KS-Herstellung zur Auswertung der Laufzeiteinsparung bei geeigneter Schüttgutmodellierung .....	177
Bild 90: Anzahl aktiver Härteprozesse im Zeitverlauf als Simulationsergebnis für die konventionelle Modellierung (oben) und die Modellierung mit Berücksichtigung der thermodynamischen Wechselwirkungen (unten) .....	178
Bild 91: Tool zur integrierten Absatz-, Losgrößen- und Reihenfolgeplanung.....	179
Bild 92: Veränderung des Zielfunktionswerts für drei Auftragspläne aus Subsystem 1 in Abhängigkeit der Freiheitsgrade "Anzahl Autoklaven" und "Beladungsstrategie" in Subsystem 2 .....	180
Bild 93: Implementierung der Funktionen des KS-Cockpit in Plant Simulation.....	181
Bild 94: Eintretende Planabweichungen im Fallbeispiel .....	181
Bild 95: Ergebnis der Simulation zur Wirkungsermittlung .....	182
Bild 96: Ergebnis des Rescheduling nach der zweiten Planabweichung..	182
Bild 97: Realisierte Anbindung von Echtzeitdaten per OPC-UA-Schnittstelle .....	183



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bewertung der Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus vergleichbaren Branchen anhand von Ähnlichkeitskriterien.....	25
Tabelle 2: Kategorisierungsschema für reaktive Optimierungsmodelle i. A. a. VIEIRA ET AL. [59] .....	33
Tabelle 3: Erfüllung von Anforderungen an eine reaktive Produktionssteuerung durch Optimierungs- und Simulationsverfahren sowie menschliche Einflussnahme .....	34
Tabelle 4: Parameter eines SARIMA( $p, d, q$ ) $\times$ $P, D, Q_s$ -Modells.....	37
Tabelle 5: Morphologischer Kasten zur Klassifikation von Modellierungsansätzen i. A. a. [143-145] .....	46
Tabelle 6: Forschungsbedarfe abgeleitet aus dem Stand von Wissenschaft und Technik.....	66
Tabelle 7: Bewertung der Adressierung vorliegender Forschungsbedarfe in vorhandenen Publikationen [41, 75, 122, 127, 161, 189, 264-282] .....	69
Tabelle 8: Richtwerte für die Fristigkeit des Simulationseinsatzes bei verschiedenen Planungshorizonten.....	77
Tabelle 9: Aggregatbezogenes Vorgehen zur Konfiguration der Energiesimulation.....	93
Tabelle 10: Eigenschaften der zu den Lastprofilen zuzuordnenden Betriebszustände .....	95
Tabelle 11: Datengrundlage für exemplarische, thermodynamische Berechnungen.....	104
Tabelle 12: Einfluss der Festlegung von Freiheitsgraden auf den Produktionsablauf .....	122
Tabelle 13: Rahmenbedingungen der Losgrößenoptimierung für das Pressen von Kalksandsteinen.....	133
Tabelle 14: Nachbarschaftsoperationen der Lösungsheuristik für das GLSPPLB-Modell .....	137
Tabelle 15: Umsetzungsanforderungen an die einzelnen Komponenten des KS-Cockpit.....	153
Tabelle 16: Dynamische Einschleusung erfasster Materialströme in ein DES-Modell.....	165
Tabelle 17: Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auf andere Anwendungen.....	185



# 1 Simulationsbasierte Regelung von Fertigungsabläufen

Unternehmen sehen sich aufgrund des zunehmenden Fachkräftemangels und steigender Ressourcenpreise der Herausforderung gegenüber, eine hohe Effizienz in ihren Produktionsabläufen zu etablieren, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Erschwert wird dieses Vorhaben durch den bis heute hohen Anteil manueller Produktionsplanungs- und Steuerungstätigkeiten, deren Komplexität durch eine wachsende Variantenvielfalt und erhöhte Qualitätsanforderungen kontinuierlich steigt.

Bei der Herstellung von Kalksandsteinen (KS) kommt hinzu, dass der direkte Einfluss externer Faktoren auf den Herstellprozess, wie Witterung, variierende Rohstoffqualitäten oder individuelle Kundenanforderungen, eine hohe Adaptionfähigkeit verlangt. Deren Relevanz erhöht sich aufgrund langer Durchlaufzeiten, die durch träge chemische Prozesse sowie Chargenfertigung bedingt sind. Ebenso erschweren starr verkettete Prozessschritte ohne Puffer- und Resequenzierungsmöglichkeit die Planbarkeit, insbesondere weil einzelne Ressourcen von mehreren parallelen Anlagen gemeinsam genutzt werden. Zudem ruft die zunehmende Individualisierung eine fortwährend steigende Variantenzahl in der Produktion hervor. Verstärkt durch einen sequenzabhängig teils hohen Rüstaufwand im Pressenbereich treibt diese den Steuerungsaufwand sowie den Flächenbedarf für die Lagerung in die Höhe.

## Zielsetzung

Um trotz begrenzter zeitlicher Kapazitäten der Verantwortlichen eine hohe Produktivität bei geringen Ressourcenverbräuchen, Beständen und Lieferzeiten zu erreichen und diese auch bei gegebener Arbeitnehmerfluktuation zu erhalten, bietet sich der Einsatz von IT-Unterstützung an. Hierdurch sollen Ineffizienzen identifiziert und diesen unmittelbar durch Generierung optimierter Lösungen für Planungs- und Steuerungsentscheidungen begegnet werden. Bei direkter Übertragung dieser Optimierungslösungen an die Steuerungssysteme ist eine eigenständige Regelung der Fertigungsabläufe realisierbar. Dennoch ist der Mensch mit der Möglichkeit, unterschiedliche Alternativen abzuwägen, als oberste Entscheidungsinstanz beizubehalten, um die Akzeptanz im Betrieb zu gewährleisten.

Die beschriebene Methodik adressiert genau eine Vision des Zukunftsprojekts „Industrie 4.0“, die postuliert, dass sich die Fabrik der Zukunft selbsttätig steuern wird [1]. Da der Kontrollverlust sowie einhergehende Zweifel an der Erreichung der Produktionsziele die Akzeptanz solcher autonomer Systeme gefährden, wie es bereits bei den Umsetzungsbestrebungen des „Computer Integrated Manufacturing“ (CIM) der Fall war [2], muss ein derartiges System durch den Menschen beherrschbar bleiben. Die fortschreitende Digitalisierung eröffnet hierzu Möglichkeiten, zielgerichtet auf eine Vielzahl aktueller Daten und Informationen zuzugreifen und so ein digitales Abbild des betrachteten Systems zu erzeugen. So lässt sich ein optimierender digitaler Zwilling des Materialflusses einrichten, der eine Abschätzung ermöglicht, ob die geplanten Abläufe in der vorgesehenen Effizienz realisierbar sind. Im Bedarfsfall ermittelt dieser – überwacht durch den Nutzer – Optimierungsvorschläge, die unmittelbar über die ausführenden Systeme einsteuerbar sind. [1, 3-5]

### Ganzheitlicher Lösungsansatz

Zur Umsetzung der aufgezeigten Methodik ist die Verwendung von Simulationsverfahren aufgrund ihrer einfachen Bedienbarkeit, flexiblen Modellierbarkeit, enthaltenen Berechnungsfunktionen sowie Visualisierungs- und Experimentierfähigkeit zielführend. Daher basiert der in dieser Arbeit verfolgte Lösungsansatz, wie in Bild 1 skizziert, auf dem Einsatz von Simulation.

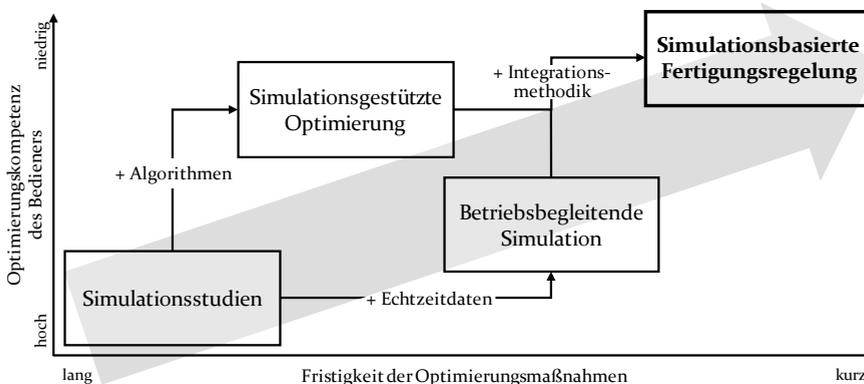


Bild 1: Methodik zur Erreichung einer Fertigungsregelung unter Einsatz der Simulation als Hauptkomponente

Um Simulationsmodelle, die aufgrund ihrer aufwendigen Parametrisierung vornehmlich für längerfristige, strategische Problemstellungen eingesetzt

werden, auch für kurzfristige Einsatzzwecke zu verwenden, sind sie automatisiert mit aktuellen Daten aus der Produktion zu parametrisieren. Dennoch sind sie weiterhin lediglich in der Lage, vorgegebene Szenarien zu analysieren, ohne Optimierungsvorschläge selbst zu generieren. Dieser Umstand kann durch die Integration von Algorithmen behoben werden. Für einen eigenständigen Einsatz zur Regelung der Fertigung ist zudem eine Methodik erforderlich, die die einzelnen Funktionen zur Bewertung des Optimierungsbedarfs, zur Durchführung der Optimierung und zur Entscheidung über die Adaption integriert und koordiniert.

### **Anforderungen der KS-Produktion an eine simulationsbasierte Fertigungsregelung**

Aus den Charakteristika einer KS-Produktion sowie den Erwartungen an eine reaktionsfähige Fertigung gehen diverse Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik zur simulationsbasierten Fertigungsregelung hervor. In Bezug auf die Simulationsmodellierung sollen in der vorliegenden Arbeit die folgenden Erfordernisse adressiert werden:

- A1** Die Simulationsmodelle sind intuitiv und zügig zu erstellen.
- A2** Die Simulationsmodelle sollen trotz eines hohen Detailgrads eine geringe Laufzeit aufweisen, um auch für kurzfristige Problemstellungen als Berechnungskern einsetzbar zu sein.
- A3** Entgegen der üblichen Anwendung einer ereignisdiskreten Modellierung sind sowohl Schüttgut (kontinuierlicher Materialfluss) als auch Stückgut (diskreter Materialfluss) im selben Modell zu berücksichtigen.
- A4** Auch energetische Einflussgrößen sind in der Simulation zu berücksichtigen, da sie auf die Abläufe in der Herstellung und damit deren Optimierung einwirken.
- A5** Thermodynamische Zusammenhänge im Härteprozess sind umfassend einzubeziehen, da sie maßgeblichen Einfluss auf die Härtezeit und somit auf den gesamten Materialfluss nehmen.
- A6** Eine mit statischen Optimierungsmodellen generierte Auftragsplanung ist im zeitdynamischen Kontext auf deren Güte hin zu untersuchen.

Für einen kurzfristigeren Einsatz der Simulation ist diese mit Optimierungskompetenz zu versehen (vgl. Bild 1). Auch hierzu ergeben sich spezifische Anforderungen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit einbezogen werden:

- A7** Jedes Simulationsmodell ist zu befähigen, auch ohne Vorgaben des Bedieners optimierte Lösungen zu generieren, um operativ effizient nutzbar zu sein.
- A8** Integrierte Algorithmen können im Bedarfsfall deaktiviert werden, um auch einfache Simulationsläufe zu ermöglichen.
- A9** Die Algorithmen sollen optimale Fertigungslose zur Minimierung der Bestände im Produktionswerk generieren.
- A10** Mithilfe der Algorithmen sind energieoptimale Strategien zur Härtekesselbeschickung zu ermitteln.
- A11** Vor dem Härteprozess soll die Abgabe thermischer Energie an die Umgebung minimiert werden.
- A12** Durch eine geeignete Prognose von Absatzmengen ist eine realistische Ausgangssituation für die Ermittlung optimaler Fertigungslose zu schaffen.
- A13** Unvorhergesehene Ereignisse sowie fortschreitende Abweichungen sind zu identifizieren und zu bewerten, um regelnd in die Fertigung eingreifen zu können.
- A14** Eine Korrektur in der Auftragssteuerung ist nur bei Erforderlichkeit und Aussicht auf Verbesserung vorzunehmen.
- A15** Optimierungsergebnisse müssen auf dem zukünftig tatsächlich vorliegenden Produktionszustand aufsetzen, um bei Vornahme der Anpassungen im Produktionsablauf nicht obsolet zu sein.
- A16** Die Optimierungsfunktionen sowie das zugrundeliegende Modell sollen sich im Laufe des operativen Einsatzes fortwährend eigenständig verbessern und an variierende Umgebungsbedingungen anpassen.

Um die aufgeführte Methodik operativ einsetzen zu können, ist das Simulationsmodell mit dem realen Produktionssystem zu verknüpfen. Dies bringt folgende Erfordernisse in Bezug auf die Datenanbindung und auf manuelle Eingriffe mit sich:

- A17** Das Simulationsmodell muss zu jedem Zeitpunkt den gegenwärtigen Zustand des Produktionssystems abbilden.

- A18** Aktuelle Daten und Informationen aus dem Produktionsbetrieb sind in die Optimierungsläufe einzubinden.
- A19** Die Methodik soll auch ohne bereits vorliegende Planungs- und Leitsysteme umsetzbar sein.
- A20** Die Verknüpfung mit aktuellen Daten aus dem Produktionssystem muss nahezu ohne manuellen Aufwand realisierbar sein.
- A21** Auch eine Kommunikation in Rückrichtung ist zu ermöglichen, sodass Fertigungsabläufe direkt aus der Simulation heraus gesteuert werden können.
- A22** Mithilfe der Methodik sind im Speziellen die Fertigungsabläufe in der KS-Herstellung mit minimalem manuellem Einsatz zu optimieren.
- A23** Der Mensch soll trotz möglicher Verwendung der Methodik zur autonomen Fertigungsregelung als Entscheidungsträger erhalten bleiben.

### Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die genannten Anforderungen geben die erforderlichen Fähigkeiten eines entsprechenden Unterstützungssystems klar vor. Es liegt jedoch weder eine allgemeingültige Vorgehensweise vor, wie ein derartiges System umzusetzen ist, noch sind Lösungsansätze oder -verfahren vorhanden, die die Berücksichtigung dieser Anforderungen ermöglichen. Demnach wird dies in der vorliegenden Arbeit nach der in Bild 2 dargestellten Struktur erarbeitet.

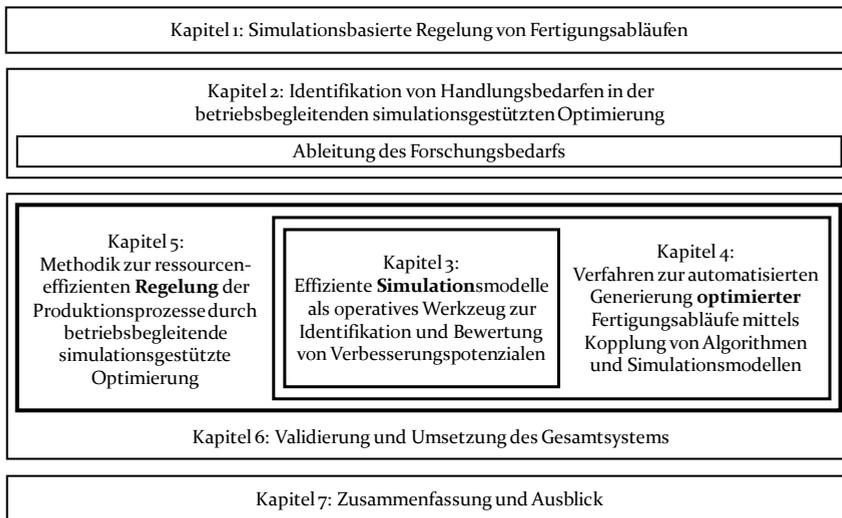


Bild 2: Zusammenhang der Kapitel in der vorliegenden Arbeit

Ausgehend von dem in Kapitel 2 erläuterten Stand von Wissenschaft und Technik für die zur Erfüllung der Anforderungen notwendigen Systeme, Werkzeuge und Methoden wird der Handlungsbedarf für die Ausarbeitung der geschilderten Methodik abgeleitet. Die Abfolge der nachfolgenden Hauptkapitel folgt dann der in Bild 1 dargestellten Fristigkeit des Simulationseinsatzes beginnend bei langfristigen Problemstellungen: In Kapitel 3 sind alle Lösungen und Vorgehensweisen für die Implementierung geeigneter Simulationsmodelle für das Unterstützungstool aufgeführt. Kapitel 4 ergänzt diese Modelle um die Entwicklung und Eingliederung geeigneter Algorithmen, die dem Tool Optimierungskompetenz und somit die Fähigkeit zum automatisierten Finden verbesserter Abläufe verleihen. Durch den Wegfall des Bedarfs an Benutzerinput eignet es sich bereits für kurzfristige Problemstellungen. Für einen operativen Einsatz als regelndes Instrument in der Fertigung ergänzt Kapitel 5 die hierfür notwendige Methodik. Um die Umsetzbarkeit der ausgearbeiteten Modellierungen, Verfahren und Konzepte nachzuweisen, folgt deren Validierung sowie eine Demonstration der prototypischen Umsetzung in Kapitel 6, bevor Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weiterreichende Forschungsoptionen abschließt.

## **2 Identifikation von Handlungsbedarfen in der betriebsbegleitenden simulationsgestützten Optimierung**

Für ein tiefergehendes Verständnis über die Optimierungspotenziale in der Kalksandsteinherstellung bildet ein Überblick über zugrundeliegende Abläufe sowie Lösungsansätze, die auf aktuellen technologischen Entwicklungen aufsetzen, die Ausgangsbasis. Demnach wird zu Beginn der Ablauf der KS-Herstellung sowie deren Steuerung im Detail erläutert, um daraus Handlungsbedarfe abzuleiten (Abschnitt 2.1). Im weiteren Verlauf werden in chronologischer Ordnung nach der Etablierung in Produktionssystemen Technologien herausgestellt, die zu einer verbesserten Gestaltung der Fertigungsabläufe beitragen.

Die zunächst vorgestellten exakten und heuristischen Optimierungsverfahren erzielen eine hohe Lösungsgüte, weisen jedoch oftmals lange Rechenzeiten oder bei hohem Abstrahierungsgrad eine unzureichende Detailgenauigkeit auf (Abschnitt 2.2). Durch das Hilfsmittel der Simulation können diese Schwachstellen ausgeglichen werden, sofern diese in geeigneter Weise mit den Optimierungsverfahren gekoppelt wird (Abschnitt 2.3). Dennoch ist die Simulation nur mit hohem Aufwand so zu parametrieren, dass die Aussagegenauigkeit und -rechtzeitigkeit auch bei kurzfristigen Problemstellungen ausreichend sind. Mit neuen Datenintegrationsverfahren aus dem Kontext der Industrie 4.0 wird abschließend diesem Nachteil begegnet (Abschnitt 2.4) und der in der Forschungslandschaft bislang nicht adressierte Forschungsbedarf abgeleitet (Abschnitt 2.5). In die Aufbereitung des nachfolgend dargestellten Stands der Wissenschaft und Technik flossen Teile der am Lehrstuhl FAPS entstandenen, vom Autor angeleiteten Arbeiten [S1-S29] ein.

### **2.1 Herstellung von Kalksandsteinen**

Die Prozesse der KS-Herstellung verlaufen in allen Werken ähnlich und lassen sich so zu einem Referenzprozessablauf hinsichtlich der Material- und Informationsflüsse zusammenfassen. Auf dieser Basis können Untersuchungen zu Optimierungsmöglichkeiten für verwandte Produktionsprozesse herangezogen werden, um deren Erkenntnisse auf die KS-Herstellung zu übertragen. Diese werden schließlich mit Zielsetzungen und Komplexitätstreibern in KS-Unternehmen in Verbindung gebracht, um geeignete Optimierungsansätze zu identifizieren.

### 2.1.1 Fertigungsprozesse und Materialflüsse bei der Kalksandsteinherstellung

Kalksandsteine werden seit mehr als einem Jahrhundert aus lediglich drei Rohstoffen hergestellt: Branntkalk, natürliche mineralische Gesteinskörnungen (im Folgenden subsumiert unter dem Begriff Sand) und Wasser [6]. Zwischenzeitlich wurden diese allein durch vereinzelt Beimischung von Zuschlagstoffen ergänzt, um spezielle Produktvarianten mit bestimmten funktionalen Eigenschaften zu erhalten. Trotz dieser überschaubaren Rohstoffanzahl, stellt sich die industrielle Herstellung im Hinblick auf eine Optimierung als komplexes System verschiedener Teilprozesse dar. Diese Komplexität beruht auf einer hohen Zahl an produzierten Varianten je Werk, welche parallel auf mehreren Anlagen gefertigt werden, sowie auf einem hohen Potenzial für Ressourceneinsparung, insbesondere beim hydrothermalen Autoklavierungsprozess.

Eine Übersicht über die Fertigungsstufen des Herstellungsprozesses für KS ist in Bild 3 gegeben. Die bevorrateten Rohmaterialien werden im ersten Schritt zunächst nach einer sortenspezifischen Rezeptur dosiert und daraufhin vermengt. Anschließend löscht der mit Wasser und Sand versetzte Branntkalk ( $CaO$ ) in einer exothermen Reaktion zu Kalkhydrat ( $Ca(OH)_2$ ) ab. Nach Abschluss dieses Vorgangs und bedarfsweisem Nachmischen zur Erreichung der notwendigen Pressfeuchte wird das Gemisch zu Rohlingen urgeformt. Diese werden im vierten Schritt in einer Wasserdampf Atmosphäre autoklaviert, um durch die entstehenden chemischen Bindungen die erforderliche Festigkeit zu erreichen. Nach dem Abdampfen der Kessel werden die fertigen Steine im Verpackungsbereich abschließend zu transportfähigen Steinpaketen gebündelt.

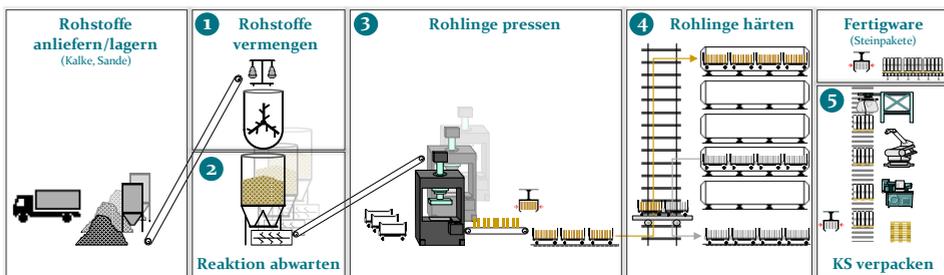


Bild 3: Allgemeiner Herstellungsprozess für Kalksandsteine

Der Materialfluss über diese fünf Fertigungsstufen wird im Folgenden detaillierter charakterisiert, wobei zur Wahrung des Fokus dieser Arbeit auf

den Einbezug von Sonderfällen (z. B. Herstellung von Passsteinen) verzichtet wird. Im darauffolgenden Abschnitt schließt eine Beschreibung der vorliegenden Informationsflüsse zur entsprechenden Materialflusssteuerung an.

### **Rohstoffanlieferung und -lagerung**

Die Rohstoffversorgung erfolgt in KS-Werken nicht bedarfsgesteuert, sondern transportkostenoptimiert mittels Vorratshaltung. Branntkalk wird in verschiedenen Sorten bei Unterschreitung eines Bestandsniveaus in Silofahrzeugen angeliefert und in Kalksilos bevorratet. Zur Deckung des Wasserbedarfs steht in einigen Werken als Alternative zur öffentlichen Wasserversorgung ein Brunnen zur Verfügung.

Der mengenanteilig größte Rohstoff Sand (Mengenverhältnis Kalk zu Sand ca. 1:12) wird entweder mithilfe von Muldenkippern angeliefert oder aus werksnahen, angeschlossenen Quarzsandvorkommen gewonnen. Nach bedarfsweiser Vorverarbeitung (Säuberung, Homogenisierung, Klassierung, Zerkleinerung) werden die unterschiedlichen Sandsorten gemeinhin auf Halden oder alternativ in Silos gelagert. Die Abnahme von dort erfolgt über Unterflurabzüge oder Schrapper, worüber die Sande alternativ Förderbändern, Becherwerken, Rüttel- oder Schneckenförderern zugeführt werden. Diese übernehmen – wie auch in allen späteren Prozessschritten mit Schüttgütern – den Transport zu Vorsilos oder direkt zu den Dosiereinrichtungen im Mischerbereich. [7]

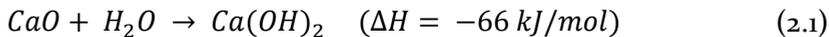
### **Prozessschritt 1: Rohstoffe vermengen**

Das Dosieren der Rohstoffe geschieht gemäß vorgegebenen Rezepturen. Zunächst werden die Sande nacheinander im jeweiligen Mengenanteil in der Regel gravimetrisch dosiert, was häufig in einem trichterförmigen Dosierbehälter oberhalb des Mixers mittels Druckmessdosen geschieht. Neben den Sanden wird an dieser Stelle auch rückgeführtes Material aus dem Pressenausschuss in einem vorgegebenen Masseanteil nach Zerkleinerung zugeführt. Getrennt von den Sanden wird der Kalk volumetrisch, zum Beispiel mittels Förderschnecke, oder gravimetrisch dosiert. Anschließend werden beide Rohstoffsorten zusammengeführt und vorgemischt. Kurz nach Beginn der Homogenisierung wird als letzter Rohstoff Wasser zugegeben, dessen Anteil an der Gesamtmischung prozentual festgelegt ist. Dieser wird in Abhängigkeit der vorliegenden Sandfeuchte ermittelt und wiederum gravimetrisch oder volumetrisch, beispielsweise mittels Durchströmungsmessgeräten, dosiert. [8]

Die möglichst gleichmäßige Vermengung aller Rohstoffe erfolgt meist in einem Chargenmischer, wovon in manchen Werken mehrere existieren, mit einer rezeptabhängigen Mischzeit. In manchen Werken werden hierfür bereits an dieser Stelle im Prozess Einzel- oder Doppelwellenmischer eingesetzt, die ohne Unterbrechung des Materialflusses kontinuierlich durchfließendes Material mittels Rührflügeln vermengen [8]. Ziel dieses Prozessschrittes ist die möglichst vollständige Homogenisierung der Rohstoffe, um die Reaktion des gesamten zugeführten Branntkalks durch Verbindung mit Wasser zu initiieren und möglichst die Oberfläche jedes Sandkorns vollständig mit Kalk als Bindemittel für den Härteprozess zu umhüllen.

### Prozessschritt 2: Reaktion abwarten

Nach dem Mischvorgang wird das durch den Kontakt von Wasser und Branntkalk ( $CaO$ ) exotherm reagierende Gemisch (s. Formel (2.1)) mittels Schwerkraft oder Fördertechnik in den dafür vorgesehenen Reaktor (mehrere parallele Reaktoren je Werk) weitergeleitet. Da den Rohlingen beim späteren Härtevorgang erneut Wärmeenergie zugeführt werden muss, gilt es über die weiteren Prozessschritte, die freiwerdende Reaktionswärme in Anbetracht der Energieeffizienz in möglichst geringem Maße an die Umgebung abzugeben.



Formel (2.1): Reaktionsgleichung für das Ablöschen von Branntkalk bei einer Temperatur von 20°C und einem Gleichgewichtsdruck von 1013 hPa nach [9, 10]

In der Regel steht in einem Werk pro Presse, wovon es zwei bis vier pro Werk gibt, ein vorgelagerter Reaktor zur Verfügung, dem im Idealfall in regelmäßigen Abständen einzelne Chargen des Rohstoffgemischs von der Oberseite zugeführt werden. Hierbei sollte der Füllstand im Reaktor durchgehend über einem Niveau gehalten werden, das sicherstellt, dass bei Abzug im steinformatabhängigen Takt der Presse stets eine Mindestaufenthaltsdauer (= kalkabhängige Reaktionszeit des Gemischs, ca. 30-120 min) eingehalten wird. Am unteren Ende verjüngt sich der zylinderförmige Reaktor, um Material dosiert abzugeben. Dort wird das Gemisch mittels spezieller Austragsvorrichtungen, z. B. Drehteller, sichelförmige Abtragsarme oder schwingender Austragskegel (vgl. [8]), abgezogen. Dadurch wird erreicht, dass ein homogener Massefluss durch den Reaktor stattfindet. Ohne eine solche Vorrichtung treten vermehrt Anbackungen sowie ein Kernfluss (s. Bild 4) auf, wodurch aufgrund der erhöhten Durchlaufgeschwindigkeit des Gemischs erforderliche Reaktionszeiten nicht eingehalten werden können. In der Folge fände nach der Formgebung an den Pressen aufgrund der

exothermen Reaktion weiterhin eine Volumenausdehnung statt, welche die Maßhaltigkeit der Steine beeinträchtigt und zu Spannungsrissen führen kann.

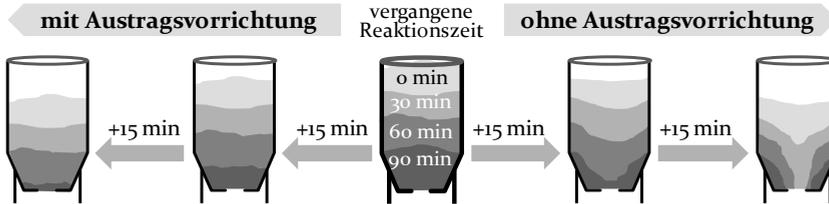


Bild 4: Massefluss in Reaktoren mit und ohne Austragsvorrichtung

### Prozessschritt 3: Rohlinge pressen

Wiederum per Fördertechnik oder Schwerkraft wird das Material nach dem Abzug aus dem Reaktor einer hydraulischen Presse zugeführt (s. Bild 5). Hier ist häufig ein Nachmischer (Einzel- oder Doppelwellenmischer) zwischengeschaltet, der das Gemisch im Durchlauf erneut homogenisiert, Agglomerate zerkleinert und durch Wasserzugabe die vorgegebene Pressfeuchte einstellt. Zunächst wird das Gemisch dann in einem Pressenpuffer bereitgehalten, um es im nächsten Pressentakt in einen Füllkasten einzuschütten. Daraufhin fährt dieser über den Formkasten des geöffneten Formwerkzeugs und füllt durch eine Öffnung an der Unterseite unter Vibration oder Einsatz von Rührflügeln zur Vermeidung von Lufteinschlüssen den Formkasten bis zur Oberkante. Durch die anschließende Zusammenführung des Ober- und Unterstempels wird das Gemisch unter Druckaufbau verdichtet, bis der vorgegebene Abstand zwischen den Stempeln erreicht ist [11, 12]. Liegt der sich hierbei einstellende Druck außerhalb eines Toleranzbereichs, werden die dabei erzeugten Rohlinge in der Maschinensteuerung als Ausschuss vermerkt, der später der Materialrückführung zum Mischerbereich übergeben wird. Die Formwerkzeuge in den Pressen sind auswechselbar, sodass unterschiedliche Steinarten und -formate hergestellt werden können. Je nach eingebauten Verschleißteilen, Füllstücken und Dorneneinsätzen ergeben sich neben Grundformaten (Voll-, Loch-, Block- und Hohlblocksteine) auch Sonderformate, die mit diversen Geometrielementen (z. B. Nut-Feder-Systeme oder Grifföffnungen) versehen sein können [13].

Die gepressten Rohlinge, die relativ schwache und leicht abbaubare physikalische Bindungen aufweisen, werden daraufhin durch Anheben des Unterstempels aus dem Formkasten ausgefahren und dort von Greiferbacken

aufgenommen, seitlich aus dem Formwerkzeug gehoben und auf einem nebenliegenden Förderband abgestellt. Dieses Band fördert die Rohlinge in formatabhängigen Schritten entsprechend dem Presentakt zu einem elektrohydraulisch oder pneumatisch betriebenen Greifer, der sie gemäß einem eingestellten Stapelbild auf einen bereitstehenden, schienengebundenen Härtewagen umhebt. Das Stapelbild wird aus Gründen der Ressourceneffizienz nach der Prämisse erstellt, ein maximales Ausfüllen des Autoklavvolumens zu erreichen. Hierbei sind Randbedingungen wie Steinformat, Greiferkonstruktion, Autoklavenabmaße und Auslegung der Verpackungsanlage einzubeziehen.

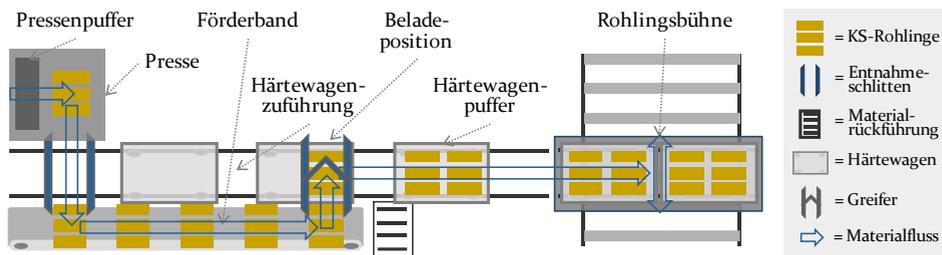


Bild 5: Layout und Materialfluss des Pressenbereichs (Ansicht von oben)

Ist ein Härtewagen vollständig beladen, wird er mittels Fördertechnik in Richtung des Schiebebühnenkanals verschoben. Bei Erreichen der erforderlichen Anzahl bereitstehender Härtewagen fährt eine manuell oder vollautomatisch gesteuerte Schiebebühne in Verlängerung der Bereitstellungs-gleise bis beide Gleise fluchten. Anschließend unterfährt ein Mitnehmerwagen der Bühne die Härtewagen, koppelt diese an und zieht sie auf die Bühnenplattform [14]. Das Gleis auf der Bühnenplattform kann je nach Bühnenkonfiguration mehrere Härtewagen aufnehmen, wobei es gewöhnlich bei einem Beladevorgang vollständig gefüllt wird. Zudem existieren Schiebebühnen mit zwei parallelen Gleisen, sodass mit einer Fahrt zwei unterschiedliche Transportaufträge erledigt werden können. In Werken mit hohem Transportaufkommen teilen sich mancherorts zwei Schiebebühnen in einem Kanal die Transportaufgaben.

#### Prozessschritt 4: Rohlinge härten

Nach erfolgter Querfahrt zum Ziel-Autoklav (AK), die in einigen Werken in Abhängigkeit des transportierten Steinformats mit spezifischen Maximalgeschwindigkeiten und Beschleunigungsrampen abläuft, klappt die Schiebebühne ein Gleisstück aus, um die aufgrund des AK-Deckels gegebene Distanz zu den Gleisen im Härtekessel zu überbrücken. Analog zum Aufziehen der Härtewagen werden diese per Mitnehmerwagen von der

Bühne in den Härtekessel eingeschoben und dort abgekoppelt. Die Zuordnung der Härtewagen zu den AK kann je nach Betriebsstrategie sortenrein oder gemischt erfolgen (s. a. [P1-P3]). Im ersten Fall werden ausschließlich Rohlinge der gleichen Steinsorte gemeinsam in einem Härtekessel autoklaviert, während diese im zweiten Fall beliebig gemischt werden, wobei die Härtewagen selbst in der Regel sortenrein beladen sind. Bei der gemischten Beladung wird dennoch versucht, nur bestimmte Steinsorten zu kombinieren (z. B. mit ähnlicher Scherbenrohichte und ähnlichem Format), da diejenige sortenspezifische Härtekurve der enthaltenen Rohlinge für das Autoklavieren angesetzt wird, die das größte Integral (vgl. Bild 6 und Bild 40 in Abschnitt 3.1.4) aufweist. Andernfalls könnten die nach dem Härten zu erreichenden Qualitätsanforderungen der enthaltenen Kalksandsteine beeinträchtigt werden, wobei sich eine längere Härtezeit als vorgesehen nicht negativ auf die Qualität auswirkt.

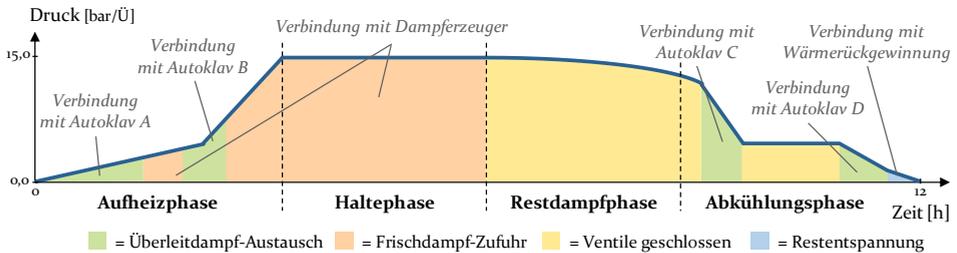


Bild 6: Reale Härtekurve für die Autoklavierung in einem KS-Werk

Der vollständig beladene AK wird – aufgrund von Betriebsanweisungen zur Einhaltung der Betriebssicherheitsverordnung [15] meist manuell – mithilfe eines Bajonettverschlusses verriegelt und steht somit für die Beschickung mit Wasserdampf zur Hydrothermalhärtung (Autoklavierung) bereit. Dieser Prozess stellt aufgrund des Energieeinsparpotenzials durch lange Bearbeitungszeiten bei begrenzten Ressourcen im Regelfall den Engpassprozess in einem KS-Werk dar. Die Versorgung mit Wasser-Sattdampf kann auf zwei Wegen erfolgen. Hat mindestens ein anderer Härtekessel (in der Regel 6-20 parallele AK in einem Werk) gerade die Restdampfphase<sup>1</sup> (vgl. Bild 6) abgeschlossen, können im Dampfsystem (Bild 7) Ventile geöffnet werden, sodass dieser AK über Überlassleitungen mit dem bereitstehenden AK gekoppelt wird. Daraufhin strömt der Dampf des Spenderkessels entlang des

<sup>1</sup> Während der Restdampfphase wird kein Frischdampf mehr zugeführt, um den Druck im Kesselinneren trotz Verlusten durch Undichtigkeiten, Kondensatabfluss u.a. konstant zu halten. Der verbleibende Druck während dieser Phase ist ausreichend, um die erforderliche Steinqualität zu erhalten.

Druckgefälles in den Empfängerkessel, bis schließlich ein Druckgleichgewicht, welches gemäß thermodynamischen Gesetzen (z. B. Wärmeübertragung mit Sattdampf, Wärmedurchgang) von den Faktoren Ausgangsdruck, -temperatur und Innenvolumen der austauschenden Systeme abhängt, erreicht ist. Dieser Vorgang kann so lange mit neuen Spenderkesseln wiederholt werden, bis das Überleiten aufgrund der rückläufigen Fließgeschwindigkeit bei abnehmendem Druckgefälle nicht mehr wirtschaftlich ist. Um den Empfängerkessel auf die erforderliche Höhe von Temperatur und Druck von ca. 201 °C bei 16,0 bar [16] zu heben, wird dann auf die zweite Art der Dampfversorgung zurückgegriffen – die Beschickung mit Frischdampf aus einem zentralen Dampferzeuger, der alle AK versorgt. Entsprechend werden die Ventile der Überlassleitungen geschlossen und die der Frischdampfleitungen geöffnet, sodass Dampf aufgrund des höheren Drucks im Dampferzeuger von dort in den Empfängerkessel strömt. [17]

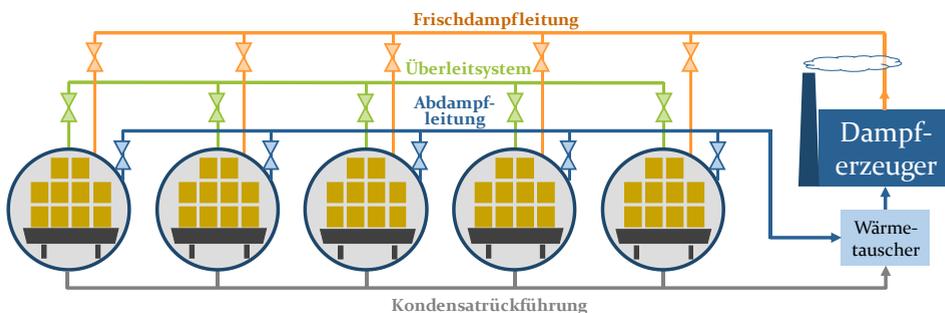


Bild 7: Fließschema der Dampf- und Wasserströme im Härteprozess i. A. a. [18]

Bei beiden Versorgungsarten werden die Ventilöffnungen so geregelt, dass die Druckzunahme im Empfängerkessel in keinem Moment schneller erfolgt, als dies die zugeordnete Härtekurve vorsieht. Denn der damit verbundene rapide Temperaturanstieg führt aufgrund der schnellen Ausdehnung des Wassers in den Poren der Rohlinge zu thermischen Spannungen, die qualitätsmindernde oder funktionsbeeinträchtigende Rissbildung hervorrufen können. Auch ein zu schneller Druckabfall im Spenderkessel kann zu Einbußen in der Steindruckfestigkeit führen [19]. Darüber hinaus sollten je nach Leistungsvermögen des Dampferzeugers nicht zu viele Härtekessel zeitgleich mit Frischdampf beschickt werden, da dadurch ein rascher Druckabfall in einem anfahrens Kessel auftreten kann, der wiederum die oben genannten Einflüsse auf die Qualität der KS mit sich bringt. [17]

Zur Energierückgewinnung kann das Dampfsystem zusätzlich zur Überleitkonstruktion mit verschiedenen Komponenten ausgestattet sein. So

dient beispielsweise kontinuierlich abgeführtes Kondensat oder der Restdampf aus dem Kesselinneren unter Einsatz von Wärmetauschern zur Vorwärmung des Speisewassers für den Dampferzeuger, das in Nieder- und Hochdruckbehältern vorgehalten wird. Zusätzlich werden Economizer verwendet, um die Wärme im Abgas des Dampferzeugers weiter zu nutzen. Trotz dieser Rückgewinnungsanlagen liegt – aufgrund der Vermeidung von Wirkungsgradverlusten beim Wärmeübertrag – das höchste Energieeinsparungspotenzial in der Überleitung von bereits verwendetem Dampf zwischen den Autoklaven. [18, 20]

Um eine isotherme Haltephase zu gewährleisten, wird kontinuierlich Frischdampf zum Ausgleich von Temperatur-/Druckverlusten zugeführt. Dabei bilden sich in der Satttdampfatmosfera in einer hydrothermalen Reaktion (Formel (2.2)) kristalline Strukturen (Calciumsilikathydrat (CSH)-Phasen), indem sich auf der Oberfläche der Sandkörner Siliziumdioxid-Moleküle lösen und mit Kalkhydrat und Wasser reagieren. Diese CSH-Phasen sorgen für eine stabile chemische Bindung zwischen den Sandkörnern und verleihen dem Stein so die erforderlichen Festigkeitseigenschaften. In Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren wie Härtedauer, -druck, -temperatur oder Mengenverhältnis der Reaktanten können sich mehr als 40 solcher kristallinen Verbindungen bilden. Für einen wirtschaftlichen Betrieb ist es ausreichend, Härtezeiten anzusetzen, in denen zwar keine stabilen Phasen erreicht werden, aber die gebildeten Kristallstrukturen zum Erzielen der geforderten Eigenschaftswerte (z. B. Steindruckfestigkeit) ausreichen. Die Reaktionstemperatur hat dabei maßgeblichen Anteil an der Reaktionsgeschwindigkeit. Durch eine Erhöhung der Temperatur um 10°C im Bereich von 125-200°C erfährt die Reaktionsgeschwindigkeit einen Anstieg um das 1,3-fache [21]. Der Druck im AK ist hierbei nur notwendig, da für die Reaktion im gesamten Porenraum des zu härtenden KS flüssiges Wasser und somit das Vorliegen von Satttdampf erforderlich ist. Bei über 225°C (entspricht etwa 25,5 bar [16]) werden KS nicht gehärtet, da dort aufgrund des technischen Aufwands für den Umgang mit den hohen Drücken keine wirtschaftliche Herstellung von Baustoffen möglich wäre. [11, 22]



Formel (2.2): Allgemeine Reaktionsgleichung für den Härteprozess von Kalksandsteinen mit Indexzahlen x,y,z in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren (gängige Werte: x = 0,8 – 1,5; y = 1; z = 1,0 – 2,0) [11]

Zum Ende der vorgesehenen Haltephase sind die erforderlichen Eigenschaftswerte der KS im Kessel erreicht, sodass der enthaltene Dampf auf

andere bereitstehende Kessel übergeleitet werden kann. Sollte zu diesem Zeitpunkt noch kein AK für die Bedampfung (Start der Aufheizphase) zur Verfügung stehen, wird eine vorgegebene Maximalzeit auf einen Empfängerkessel gewartet. Ergibt sich keine ökonomisch sinnvolle Möglichkeit mehr, den Dampf überzulassen, wird er dem Wärmerückgewinnungssystem zugeführt (= Abdampfphase). Diese Entscheidungsgrenze variiert je nach betrachtetem Werk. Bei geringem Restdruck kann der AK langsam gegenüber der Umgebung geöffnet werden, wobei hierbei durch den Druckabfall erneut Kondensat rückverdampfen kann. Dies wirkt wiederum dem Druckabfall entgegen und führt kurzzeitig gar zu einem leichten Druckanstieg, sodass für das Öffnen der AK-Türen in Abhängigkeit der gehärteten Steinsorte stets einige Minuten zu veranschlagen sind.

Die fertig gehärteten KS können nun aus dem AK entladen werden. Liegen Sackkessel vor, bei denen nur auf einer Stirnseite des AK eine Tür existiert, so werden die Härtewagen analog zur Beladung mithilfe derselben Schiebebühne aus dem Kessel gezogen. Findet man andererseits Durchzugskessel mit je einer Öffnung an beiden Stirnseiten vor, so gibt es layoutabhängig zwei Möglichkeiten der Entladung. Bei Vorliegen von Puffergleisen in Verlängerung der AK, welche für gewöhnlich dieselbe Beladungskapazität wie die Kessel selbst besitzen, können die Härtewagen mittels Seilwinde auf eine weitere Schiebebühne hinter den Puffergleisen gezogen werden. Ohne einen solchen Puffer schließt in der Regel ein weiterer Schiebebühnenkanal an der Rückseite der AK an, über den die Härtewagen analog zur Entladung bei Sackkesseln direkt auf die Bühne gezogen werden. Da die Härtewagenlogistik zumeist an das gegebene Anlagenlayout angepasst werden muss, existieren neben den genannten Formen weitere Spezialkonfigurationen.

### **Prozessschritt 5: Kalksandsteine verpacken**

Von den entladenden Schiebebühnen werden die Härtewagen dem Verpackungsbereich zugeführt, wo sie zu Beginn meist auf einem Gleis gepuffert werden, das mit einer Seilzuganlage ausgestattet ist, um die Härtewagen zu befördern. Angekommen an einem Portalkran werden die KS vom Härtewagen abgenommen, verdichtet und bei Bedarf auf Paletten gestellt. In manchen Verpackungsanlagen werden einzelne KS-Reihen auch separat vom Härtewagen entnommen und auf einer parallelen, fahrbaren Sortierplattform zwischengelagert, wenn zur optimalen Kesselausnutzung an der Presse Stapelmuster (vgl. Prozessschritt 3) gewählt wurden, aus denen nicht direkt komplette Verpackungseinheiten entnommen werden können. Nach der Härtewagenentnahme durchlaufen die KS mehrere sequentiell getaktete Verpackungsstationen. Dazu gehören beispielsweise weitere

Verdichter, vertikale und horizontale Umreifungsanlagen, eine Foliermaschine oder eine Signieranlage. Nach der Verpackung werden die Steinpakete auf automatischen Fördersystemen für die Abnahme per Kran oder Gabelstapler bereitgestellt. Die leeren Härtewagen werden über ein Gleissystem, das teils wiederum über die Schiebebühnenkanäle leitet, zu den Pressen rückgeführt.

### 2.1.2 Informationsflüsse zur Steuerung der Materialströme

In Abhängigkeit des Modernisierungsgrads eines KS-Werks ist es möglich, die Prozessschritte mithilfe von Automatisierungslösungen effizient aufeinander abzustimmen, um Verschwendung wie lange Wartezeiten, Ausschuss, ineffizienter Energieeinsatz oder Überproduktion zu reduzieren. In einigen Werken mangelt es jedoch an einer ausreichenden informationstechnischen Vernetzung und einer übergeordneten, automatisierten Steuerung der Prozessschritte, sodass diese Koordinierung manuell erfolgen muss. Bild 8 stellt demzufolge die Informationsflüsse bei einer automatisierten und einer rein manuellen Steuerung gegenüber. In der weiteren Beschreibung wird anhand dieser Abbildung eine in vielen Werken realisierbare Mischform des Informationsflusses erläutert, welche für einen effizienten Betrieb aller Anlagen sorgt und auch bei unzureichender Vernetzung weitgehend manuell umsetzbar ist. Diese stellt die Referenz für alle Konzepte und Modellierungen in dieser Arbeit dar. Aufgrund mangelnder Literaturstellen in diesem Kontext vereint die vorgestellte Struktur die Erkenntnisse aus 14 Fallstudien zu einem übergreifenden Referenzkonzept.

Die Fertigungsaufträge werden ausgehend vom Pressenbereich (dritter Prozessschritt der KS-Herstellung – vgl. Bild 3) über die vorgelagerten Fertigungsstufen disponiert (s. Bild 8: ❶), da dort die größten Rüstzeiten anfallen. Nach Möglichkeit werden die Auftragsmengen in Abstimmung mit dem Vertrieb sowie abhängig von Lagerbeständen und -kapazitäten so gebildet, dass der gesamte Pressenoutput dem Vielfachen eines Härtewagens oder sogar einer Autoklavenfüllung entspricht. Auf Basis der dafür erforderlichen, rezeptabhängigen Materialmenge werden daraufhin die Mischaufträge mit konstanter Chargenmenge errechnet. Hierbei gilt es zu beachten, dass die Mischvorgänge eine ausreichende Vorlaufzeit vor dem Pressen des jeweiligen Materials aufweisen müssen, damit die endotherme Reaktion vor der Verdichtung vollständig abgeschlossen ist. So ist der erste Mischvorgang dann zu starten, wenn die Rüstzeit einschließlich der Restzeit des vorangegangenen Auftrags der Reaktionszeit des Rohmaterials entspricht. Dieser Zeitpunkt ist umso schwerer zu treffen, wenn ein Mischer mehrere Pressen zeitgleich versorgen muss. Denn zusätzlich sollte der

Mischvorgang nicht zu früh gestartet werden, um einen möglichst geringen Anteil der Reaktionswärme an die Umgebung zu verlieren und die Pressfeuchte durch zeitlich limitierte Verdunstung des enthaltenen Wassers im Toleranzbereich zu halten [18].

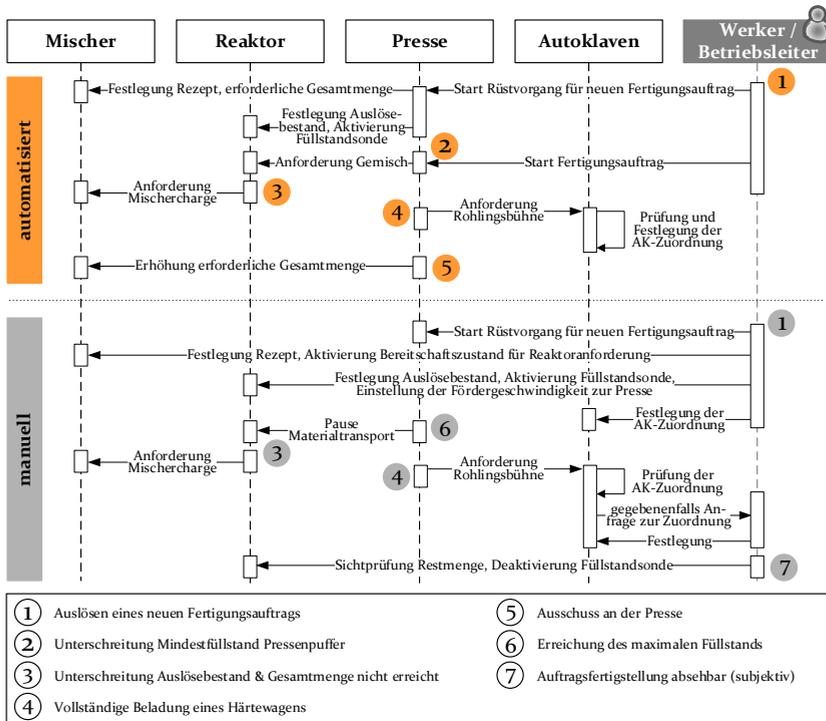


Bild 8: Informationsfluss zur Koordinierung der Herstellungsprozesse von KS

Um die Materialversorgung der Pressen nicht abreißen zu lassen, werden bei Unterschreiten eines per Füllstandsonde gemessenen Auslösebestands im Reaktor so lange Mischerchargen angefordert, bis die vorgegebene Obergrenze für den Füllstand erreicht ist (s. Bild 8: ③). Die Materialanforderungen aller Reaktoren werden in eine Auftragsliste geschrieben und vom Mischer nach dem Windhundprinzip abgearbeitet, sofern keine anderweitigen Priorisierungen vorgenommen wurden oder keine Alternierung vorgesehen ist. Eine Auslösung von Materialanforderungen auf Basis von Verbrauchswerten an den Pressen ist nur in wenigen Werken realisiert, da die Anlagensteuerungen in den meist historisch gewachsenen Werken nicht ausreichend vernetzt sind. Die Materialanforderungen der Vorsilos bei den Rohstoffhalden oder -silos erfolgen nach demselben Prinzip. Diese wiederum werden regelmäßig auf Bestellung von Lieferanten oder aus werkseigenem Abbau aufgefüllt.

Liegt in einem KS-Werk kein Produktionsleitsystem (MES) vor, so würde ein Reaktor bei Erreichen des Auslösebestands stets Materialchargen nach dem vorgegebenen Rezept vom Mischer anfordern, selbst wenn dort bereits ausreichend Gemisch bis zum Abschluss des vorliegenden Fertigungsauftrags vorhanden ist. Die automatisierte Zufuhr ist entsprechend zu einem geeigneten Zeitpunkt manuell zu beenden. Das MES kann vor jeder Anforderung abfragen, ob im Reaktor ausreichend Material für die restlichen Pressenhübe einschließlich prognostiziertem Ausschuss vorliegt, sodass der Mischvorgang nicht gestartet würde. Da eine Unterdeckung im Reaktor aufgrund der langen Reaktionszeiten ungünstig ist, wird hierbei stets ein gewisser Puffer eingesetzt. Dieser überschüssige Anteil an Rohmischung dient für den nachfolgenden Fertigungsauftrag zur Einstellung der Presse, wobei der dabei entstehende Anfahrausschuss über die Materialrückführung neuen Mischaufträgen beigegeben wird.

Alle Reaktoren sind für einen Fertigungsauftrag stets einer Presse, in der Regel in einem 1:1-Verhältnis, fest zugeordnet. Daraus wird der Pressenpuffer kontinuierlich befüllt, solange die entsprechende Füllstandsonde kein Überschreiten einer Obergrenze meldet (s. Bild 8: ⑥). Die Geschwindigkeit des Zuführbandes kann so geregelt werden, dass häufige Schaltungen vermieden werden. Mit diesem Zuführband ist auch der Nachmischer gekoppelt, der das beförderte Gemisch erneut homogenisiert und die nötige Pressfeuchte einstellt. Die Anforderung eines neuen Härtewagens wird per Lichtschranke ausgelöst, sobald diese durch Vorschub des zuvor bereitgestellten Härtewagens auf die Beladeposition nicht mehr unterbrochen ist.

Ist ein Härtewagen vollständig beladen, so werden alle bereitstehenden Wagen um eine Position nach vorne versetzt. Das Durchbrechen einer Lichtschranke durch den führenden Wagen meldet der automatisierten Schiebebühne die Bereitschaft zum Verfahren in einen AK (s. Bild 8: ④). Eine individuelle Logik in der Schiebebühnensteuerung regelt die Reihenfolge ihrer Transportaufträge. In Abhängigkeit verschiedener Rahmenbedingungen, wie der Kesselart, der Bühnenanzahl oder des aktuellen Aufenthaltsorts, priorisiert das System bestimmte Aufträge, um vorrangig die Härtung energieeffizient zu betreiben, aber auch Engstellen zu vermeiden. Die Zuordnung der Härtewagen zu einem AK geschieht entweder manuell oder wird in einem MES gemäß der gegebenen Härtestrategie (s. Seite 13 oben) bedarfsgerecht errechnet. Muss hierzu ein weiterer Kessel belegt werden, so sollte stets der zuletzt abgedampfte AK herangezogen werden, da dieser im Regelfall den größten Temperaturgradienten zur Umgebung aufweist. Folglich wird der geringstmögliche Anteil der gespeicherten Wärmemenge aller Härtekessel an die Umgebung abgegeben.

Das gesamte Dampfsystem einschließlich Wärmerückgewinnungskomponenten und somit der Härteprozess der KS wird ohne Verknüpfung zu den anderen Fertigungsstufen automatisiert gesteuert. Sobald die Kesseltüren geschlossen und in der Steuerung die Härtekurve eingestellt wurden, regelt das System die gesamte Dampfverteilung in Abhängigkeit aller erfassten thermodynamischen Einflussfaktoren (s. Bild 39, Seite 88) sowie der Leistung des Dampferzeugers selbstständig. Hierbei kann der Kesselwärter jedoch durch Variation von Parametern, wie Wartezeiten für die Dampfüberleitung, Druckgrenzen für das Abdampfen oder Restriktionen zur parallelen Frischdampfbeschickung, eingreifen. Selbst ein manueller Betrieb ist möglich.

Nach Abschluss der Härtung und vollständigem Abdampfen und Öffnen eines Kessels meldet der Kesselwärter dies an das Schiebebühnensystem. Analog zur Kesselbeschickung organisiert die Schiebebühnensteuerung den Transport zur Verpackungslinie, sobald dort ausreichend Stellflächen zur Verfügung stehen. Liegen mehrere Linien vor, wird die Auswahl entweder manuell oder gemäß vorgegebenen Restriktionen im Steuerungssystem getroffen. Die Verpackungsanlagen sind im Regelfall rüstkfrei und identifizieren das anstehende Steinformat entweder über eine Codierung am Härtewagen, die an den Pressen mit der Steinsorte verknüpft wurde, oder über Informationen aus einem Produktverfolgungssystem. Bei älteren Anlagen kann diese Identifizierung auch manuell erforderlich sein. Ab dem Umheben der KS vom Härtewagen auf die Fördertechnik der Verpackungsanlage laufen die Steine im vorgegebenen Takt sequenziell über alle Stationen. Verpackungsmaterial wird an den Verpackungsstationen bereitgestellt, wobei Nachfüllbedarf visuell, zum Beispiel per Lichtsignal, mitgeteilt wird. Anhand eines mittels Signiermaschine angebrachten Labels identifiziert ein Logistiker die Steinpakete, die auf einem direkt an die Verpackung anschließenden Puffer (Rollenbahn oder Kettenförderer) für den Abtransport ins Lager bereitgestellt werden.

In der Gesamtheit lässt sich festhalten, dass der Informationsfluss in einem KS-Werk bislang weniger auf eine ressourceneffiziente Steuerung hin ausgelegt ist, sondern vorwiegend der Automatisierung von Abläufen dienen soll. Selbst in Werken mit hohem Automatisierungsgrad liegt hohes Potenzial hinsichtlich einer Steigerung der Ressourceneffizienz vor, da beispielsweise die Steuerung des Härteprozesses weiterhin von den vor- und nachgelagerten Prozessen entkoppelt ist. Zudem wird durch multiple Pufferbestände (Vorsilos, Pressenpuffer etc.) zwischen nahezu allen Teilschritten Sicherheit in der Materialversorgung erkaufte sowie Ressourceneffizienz vernachlässigt (vgl. optimaler Mischzeitpunkt), was jedoch unweigerlich

zu erhöhten Durchlaufzeiten führt. Um all diese Defizite zu beseitigen, zeigt diese Arbeit eine Methodik auf, die mithilfe von durchgängigem Informationsaustausch und präskriptiven Analysen (vgl. [1]) den gesamten Produktionsprozess planbarer, effektiver und ressourceneffizienter gestaltet.

### 2.1.3 Klassifizierung des Prozesses

Bezüglich einer detaillierten Untersuchung der Produktionsabläufe bei der KS-Herstellung existieren bisher nur wenige Literaturstellen, vornehmlich von GUNDLACH aus den Jahren 1978-1984 [7, 8, 14, 17, 23-25]. Da auch dort der Fokus auf der Beschreibung der Prozessschritte und eingesetzten Technologien liegt, stellt die vorausschauende Regelung der Produktionsabläufe mithilfe von simulationsgestützten Optimierungstools ein neues Forschungsfeld dar. Aufsetzen kann dieses auf die Ergebnisse aus einem Forschungsprojekt des Autors aus dem Jahr 2015 [P4], in dem grundsätzliche Untersuchungen zur Modellierung von KS-Werken in einer Materialflusssimulation und zu geeigneten Optimierungsverfahren für die Steuerung der KS-Produktion durchgeführt wurden. Um in dieser Arbeit auf bewährte Ansätze aus vergleichbaren Branchen, Prozessen und Technologien zurückgreifen zu können, wird im Folgenden der Herstellungsprozess für KS anhand seiner Produktionsausprägungen charakterisiert. Die Auswertung basiert auf einer qualitativen Bewertung diverser Kriterien, die der systemorientierten Vorgehensweise von DYKHOFF/SPENGLER [26] entstammen. Die Einordnung des Herstellungsprozesses für KS sowie vergleichbarer Branchen ist in Bild 9 (S. 23) dargestellt und wird nachfolgend begründet.

1. Die Rohstoffe der KS-Herstellung (Kalk, Sand, Wasser, Zuschlagstoffe) sind ausschließlich Schüttgüter bzw. Fließgüter und somit der Kategorie der formlosen Güter zuzuordnen. Das Vorliegen formloser Güter als Ausgangsstoffe sowie deren Verarbeitung lässt nach [27] auf eine Einordnung in die Prozessindustrie schließen. Da jedoch ab dem Pressen Rohlinge als Stückgut weiterverarbeitet werden, liegt ab diesem Zeitpunkt ein diskreter Güterfluss vor, sodass von einer Fertigungsindustrie auszugehen ist. Aufgrund dieses Übergangs und der jeweiligen Bearbeitung von sowohl Schütt- als auch Stückgut ist die KS-Herstellung gemäß [28, 29] der Hybridfertigung zuzuordnen. Derartige Formen der Fertigungsorganisation stellen eine besondere Herausforderung bei der Erstellung von Simulationsmodellen dar, was in Abschnitt 3.1.3 adressiert ist.

2. Entgegen der gängigen Einordnung von Produktionsprozessen der Prozessindustrie findet man bei der KS-Herstellung keine umgruppierende, sondern eine konvergierende Struktur vor. Aus mindestens drei Werkstoffarten entsteht final eine Produktart „Kalksandstein“.
3. Die gängigste Fertigungsart für KS ist die Serienfertigung. Es werden stets Chargen bearbeitet und befördert. Ebenso werden an den Pressen einzelne Steinsorten in Losen hergestellt, die in ihrer Größe variabel sind. Daher ist eine Massenfertigung ausgelegt auf Kostenvorteile durch hohe Ausbringungsmengen und einheitliche Produkte nicht gegeben. In wenigen Werken stehen jedoch Anlagen (spezielle Pressen, Sägen und Greifer) zur Verfügung (vgl. hierzu z. B. [30]), mit denen kundenindividuelle Steingeometrien in Losgröße eins gefertigt werden können. In diesem Fall liegt somit eine Einzelfertigung vor.
4. Trotz Fertigungsstationen, die auf einen geradlinigen Materialfluss ausgelegt sind, liegt aufgrund von vorliegenden Zwischenpuffern, gleichartigen parallelen Anlagen und nicht getakteten Arbeitsschritten keine Fließbandproduktion vor. Aufgrund der genannten Eigenschaften kann aber von einer Reihenfertigung gesprochen werden.
5. In den einzelnen Herstellungsstufen treten unterschiedliche Prozesscharakteristika auf. Physikalische Wirkprinzipien werden besonders bei der Rohlingsbildung an den hydraulischen Pressen genutzt. Der exothermen Reaktion in den Reaktoren sowie der Autoklavierung in den Härtekesseln liegen hingegen stoffumwandelnde, chemische Verfahren zugrunde. Da erst durch das hydrothermale Härten der Steine die erforderliche Stabilität erzielt wird, ist dieses als primäres Verfahren einzustufen.
6. Auf allen Produktionsanlagen werden KS verschiedener Größen, Formen und Materialzusammensetzung produziert, was einer Mehrproduktfertigung entspricht.
7. Aufgrund dieser geringfügigen Unterscheidung in den Varianten und der engen Verwandtschaft der Fertigprodukte findet eine Sortenproduktion statt.
8. Trotz hoher Variantenvielfalt werden bei der KS-Produktion keine kundenindividuellen sondern nach DIN EN 771-2 [13] standardisierte Produkte hergestellt. Lediglich in wenigen Werken können auch maßgeschneiderte Steingeometrien zur Ergänzung der standardisierten KS gefertigt werden, damit diese nicht erst auf der Baustelle auf die erforderliche Form gesägt werden müssen.

9. Aufgrund der saisonalen Auftragslage in der Baubranche wird zum Zwecke einer maximalen Auslastung der Produktionsanlagen ein Großteil der KS auf Lager produziert. Dies bedingen auch große Losgrößen, die aufgrund oft mehrstündiger Rüstprozesse erforderlich sind, wodurch die Lieferfähigkeit bei allen Varianten nur über Lagerbestände gewährleistet ist. Lediglich Exoten oder kundenindividuelle Steine werden teils auftragsbezogen hergestellt.

Neben der Einordnung der KS-Herstellung ist in Bild 9 auch die Charakterisierung von Produkten aus vergleichbaren Branchen ersichtlich. Diese Vergleichsbranchen sind aus der Klassifikation der Wirtschaftszweige des Statistischen Bundesamtes [31] abgeleitet, indem nach ähnlicher Eingliederung sowie einem ebenfalls vorliegenden hybriden Produktionsablauf mit urformenden Prozessen sowie Ofenprozessen als Hauptkomponenten recherchiert wurde.

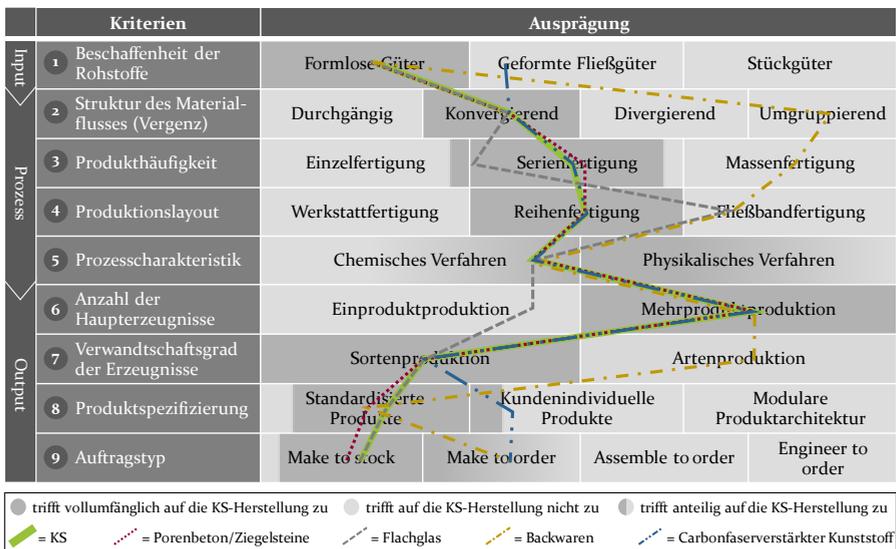


Bild 9: Charakterisierung der KS-Produktion nach [26] im Vergleich zu anderen Industriezweigen mit ähnlichen Herstellprozessen

Alle Vergleichsbranchen stammen aus dem verarbeitenden Gewerbe. Lediglich die Backwaren- sowie CFK-Branche (carbonfaserverstärkte Kunststoffe) entstammen nicht der Abteilung „Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden“. Flachglas und Ziegelsteine gehen nicht mehr aus derselben Gruppe wie KS hervor und Porenbetonsteine weichen erst in der Klasse ab.

2 Identifikation von Handlungsbedarfen in der betriebsbegleitenden simulationsgestützten Optimierung

Zusätzlich zur Charakterisierung nach Produktionsausprägungen gibt ein Abgleich der Herstellungsprozesse Aufschluss bezüglich der Übertragbarkeit etablierter Optimierungsansätze aus den genannten Vergleichsbranchen. Zu diesem Zweck sind in Bild 10 die Prozessketten zur Herstellung dieser Produkte gegenübergestellt und bezüglich Gemeinsamkeiten in Prozessschritten, eingesetzten Anlagen, Transportmitteln und Güterbeschaffenheit ausgewertet.

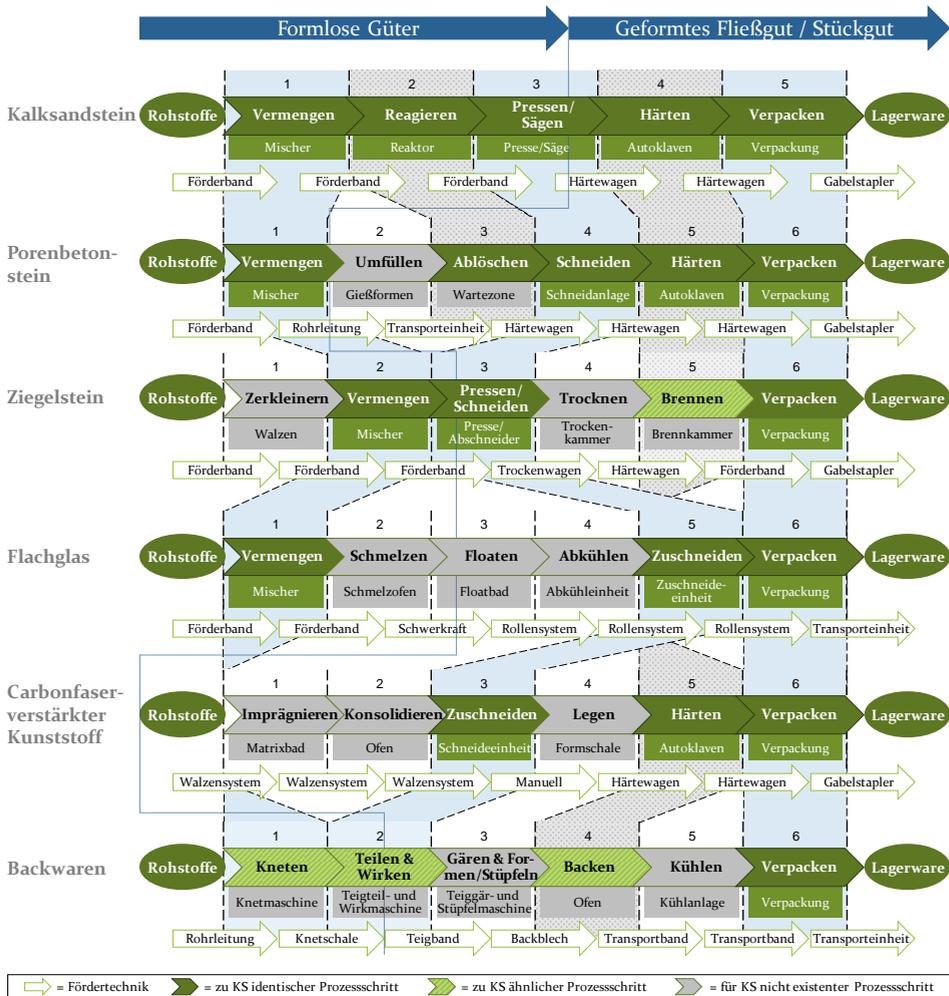


Bild 10: Vergleich ähnlicher Prozessketten aus verwandten Branchen

Tabelle 1 führt die zugrundeliegenden Literaturstellen für die Prozessbeschreibungen auf, aus denen sowohl die Einordnung nach den Produkti-

onsausprägungen in Bild 9 hervorgeht, als auch die Erstellung der Prozessketten abgeleitet ist. Da der Produktionsprozess entscheidenderen Einfluss auf die Übertragbarkeit von Modellierungen und Methoden hat, werden die Prozessketten gegenüber der Charakterisierung doppelt gewichtet. Die einzelnen Bewertungen der Affinität gegenüber der KS-Produktion erfolgen anhand einer Skala von eins bis fünf, wobei der Wert 1 einer sehr hohen Ähnlichkeit entspricht, während beim Wert 5 nahezu keine Affinität vorliegt.

Die Bewertung in Tabelle 1 indiziert, dass die Herstellungsprozesse für weitere Mauersteine (Porenbeton- und Ziegelsteine) am ehesten mit denen der KS-Herstellung übereinstimmen. Auch die Flachglas- und die CFK-Produktion nach dem Prepreg-Verfahren weisen an einigen Stellen eine große Ähnlichkeit zur KS-Herstellung auf. Bei Backwaren hingegen fallen diese Übereinstimmungen sehr gering aus.

Als Ergebnis des Vergleichs mit anderen Branchen lässt sich festhalten, dass viele Herstellungsprozesse existieren, die zumindest in bestimmten Charakteristika denen der KS-Herstellung ähnlich sind. Dies gilt insbesondere für die eingesetzten Anlagen, Prozessfolgen und Transportmittel, wo oft nur im Detail Unterschiede auftreten. Dieser Detailgrad ist aber für die Übertragbarkeit von Modellierungen oder Methoden im Bereich der Regelung von Produktionsabläufen nicht von Relevanz. Folglich können im weiteren Verlauf dieser Arbeit bewährte Ansätze aus den angegebenen Branchen als Grundlage für die jeweiligen Entwicklungen im Kontext der KS-Herstellung herangezogen werden.

Tabelle 1: Bewertung der Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus vergleichbaren Branchen anhand von Ähnlichkeitskriterien

Branche	Quellen	Affinität		Bewertung
		Charakterisierung	Prozesskette	
Porenbeton	[32-34]	2	1	1,3
Ziegelstein	[35, 36]	2	2	2,0
Flachglas	[37, 38]	3	4	3,7
CFK (Prepreg-Verfahren)	[39-42]	3	3	3,0
Backwaren	[43, 44]	4	4	4,0

Bewertungsskala: 1  $\hat{=}$  sehr hohe Ähnlichkeit, ..., 5  $\hat{=}$  nahezu keine Übereinstimmung

### 2.1.4 Zukunftsfähigkeit und Handlungsbedarf

KS-Unternehmen stehen im Baustoffmarkt insbesondere mit Herstellern anderer Mauersteine (Ziegel, Porenbeton, Leichtbeton u. a.) im Wettbewerb. Um in Bezug auf die Produktionskosten konkurrenzfähig zu bleiben, stellt ein effizienterer Einsatz von Arbeit, Betriebsmitteln und Energie einen großen Hebel dar. Trotz eines wenig komplex anmutenden Produktionsablaufs sind diese Potenziale aber nur unter hohem koordinativem Aufwand auszuschöpfen. [45]

Ein Großteil der KS-Werke besteht seit mehreren Jahrzehnten und viele Produktionsanlagen entsprechen dem Alter der Werke. Aufgrund des etablierten Prozessablaufs und der Dimensionierung der Anlagen gibt es auch im Bereich des Materialflusses im Regelfall nur wenige Änderungen, sodass noch immer starr verkettete Materialflusstrukturen und mehrere parallele Anlagen je Fertigungsstufe vorliegen. Lediglich der Automatisierungsgrad hat im Laufe der Zeit zugenommen. Neben dieser starren Struktur ist die Komplexität durch folgende Treiber bedingt:

- Es wird eine große Zahl unterschiedlicher Steinsorten vertrieben [13], die durch den Wandel zu einem Käufermarkt sowie Ergänzungen des Sortiments um spezifische Komplementärgüter bei Einführung neuer Formate weiter zunimmt.
- Für den Formwerkzeugwechsel sind lange Rüstzeiten erforderlich (vgl. [P4]).
- Aufgrund der starren Verkettung existieren keine supermarktähnlichen Zwischenlager zur Entkopplung von schwankenden Kundenabrufen.
- Die Härtung ist der einzige Chargenprozess inmitten von Fließprozessen.
- Der Härteprozess ist aufgrund interner Wechselwirkungen gepaart mit unbeeinflussbaren externen Einflüssen schwer planbar (vgl. Abschnitt 3.1.4).
- Steigende Energiepreise erhöhen den Kostendruck.
- Saisonale Nachfrageschwankungen und kurzfristige Bedarfsänderungen erschweren die Absatzplanung und beeinflussen die Produktion.
- Zwischen Produktionsanlagen und Planungs-/Leitsystemen liegt nur eine geringe Vernetzung vor.

Diese Komplexität führt in ihrer Gesamtheit zu konkurrierenden Zielstellungen, die in Bild 11 visualisiert sind. Sie alle sind gegeneinander abzuwägen und zu einem möglichst optimalen Grad zu erfüllen.

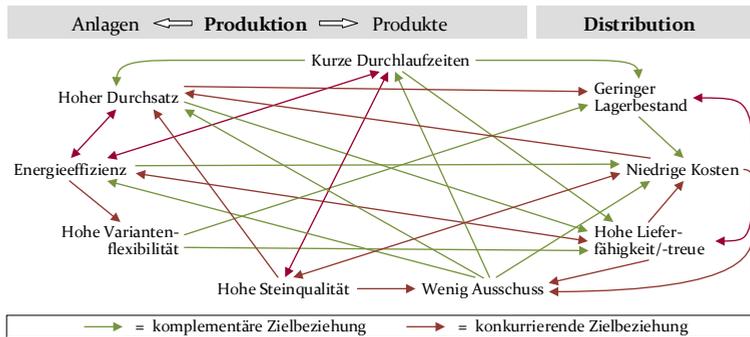


Bild 11: Wechselwirkungen zwischen Produktionszielen in KS-Unternehmen

Um in diesem Spannungsfeld zu einer optimalen Gesamtlösung zu gelangen, sind alle Abläufe bestmöglich aufeinander abzustimmen und Alternativen zu bewerten, was mit manuellen Mitteln nicht zu bewältigen ist. Entsprechend bedarf es eines verstärkten Einsatzes von IT-gestützten Hilfsmitteln. Diese ermöglichen es, die Erfüllung der Zielstellungen vorab zu bewerten (z. B. per Simulation) und die Produktionsabläufe so auszusteuern, dass sie zu einer bestmöglichen Zielerreichung führen (z. B. mittels Optimierungsalgorithmen). Da unvorhergesehene Ereignisse nicht ausgeschlossen werden können, sind die Unterstützungssysteme so auszulegen, dass sie bei Planabweichungen eingreifen und unmittelbar einen neuen optimalen Ablauf ermitteln. Entsprechend müssen sie in der Lage sein, produktionssynchron auf Basis von Echtzeitdaten<sup>2</sup> zu reagieren. In solchen Verfahren steckt enormes Potenzial für Effizienzsteigerungen, weshalb sie im weiteren Verlauf dieser Arbeit detailliert aufgearbeitet werden.

## 2.2 Optimierungsverfahren für die Steuerung von Produktionsabläufen

Bei der Optimierung von Fertigungsabläufen ist die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) als koordinatives Instrument ein elementarer Bestandteil. Sie kommt als IT-System zum Einsatz, da die in sich komplexen und untereinander zusammenhängenden Prozesse in Produktionssystemen manuell nicht effizient steuerbar sind. Zu Beginn dieses Abschnitts wird die Funktionsweise solcher Systeme für Lagerfertiger, wie es auch KS-

<sup>2</sup> „Echtzeit“ beschreibt in dieser Arbeit stets einen sehr kurzen Zeitraum, der für einen Vorgang erforderlich ist. Es wird hierbei aber kein Anspruch darauf erhoben, dass dieser Zeitraum kurz genug ist, um Anlagen mechanisch in Echtzeit zu steuern. Jedoch muss der Zeitraum ausreichend kurz sein, sodass der betrachtete Vorgang bei dessen Beendigung nicht bereits überholt oder obsolet ist.

Werke sind, übersichtlich dargestellt und hieraus die für kurzfristige Einsatzzwecke bedeutendere Produktionssteuerung konkretisiert.

Da die erwarteten Produktabsätze die Ausgangsbasis aller Planungen bilden, werden vorab verschiedene Verfahren der Absatzplanung gegenübergestellt. Die daraufhin erforderliche Ermittlung optimaler Mengen, Termine, Reihenfolgen und Kapazitätsauslastungen erfolgt durch die Formulierung als Scheduling-Problem, das in Abhängigkeit des zugrundeliegenden Prozesses spezifisch auszugestalten ist. Für dessen Lösung existieren für verschiedene Problemarten vielfältige algorithmische und heuristische Ansätze, die für das vorliegende Optimierungsproblem und dessen Einsatzszenario geeignet zu wählen sind. Zur Berücksichtigung zeitdynamischer Zusammenhänge und zur Erreichung eines höheren Detaillierungsgrads im Modell werden diese Optimierungsmethoden oftmals mit Simulationswerkzeugen gekoppelt. Gängige Verknüpfungstypen hierfür werden abschließend gegenübergestellt und bewertet.

### **2.2.1 Evolution der Produktionsplanung und -steuerung**

Ihren Ursprung findet die PPS in der Materialbedarfsplanung (MRP), welche Ende der 1960er Jahre durch die Einführung von Computern im geschäftlichen Umfeld aufkam. Auf diese reine Bestimmung aller erforderlichen Materialmengen für ein Produktionsprogramm, bei der auf Basis einer Stücklistenauflösung für jedes Produkt einzeln und ohne Kapazitätsbeschränkungen Losgrößen errechnet werden, folgte ab 1981 das Manufacturing Resource Planning (MRP II) [46]. Dieses erweiterte das MRP um die Optimierung von Herstellungsprozessen durch eine Berechnung von Materialbedarfen gemeinsam mit der Planung aller erforderlichen Produktionsressourcen (z. B. Anlagen, Personal, sonstige Betriebsmittel). Hierzu wurde die Terminierung von Produktionsaufträgen unter Berücksichtigung von Ressourcenkapazitäten (= Termin- und Kapazitätsplanung) in die Produktionsplanung einbezogen, um die sich daraus ergebenden Restriktionen zu berücksichtigen. Im Laufe der Jahre wurden eine vorgelagerte Bedarfsplanung sowie weitere Geschäftsbereiche, wie Einkauf, Vertrieb, Personalverwaltung oder die Produktionsdatenerfassung, in das MRP II integriert. Aufgrund des Bestrebens, alle wirtschaftlich relevanten Ressourcen in der Produktionsplanung zu berücksichtigen, wurden MRP-II-Systeme Ende der 1980er Jahre zu heutigen „Enterprise Resource Planning“ (ERP) Systemen weiterentwickelt. Diese waren nunmehr nicht nur für produzierende Unternehmen einsetzbar und bilden weitere Geschäftsbereiche, wie Finanz- und Rechnungswesen, Projektmanagement, Controlling, Enginee-

ring oder Vertrieb, ab. Aufgrund dieser unternehmensweiten Einsetzbarkeit haben sich ERP-Systeme bis heute als Basisplattform für alle betrieblichen Informationssysteme etabliert. [5, 47, 48]

Trotz der kontinuierlichen Erweiterung und Verbesserung der PPS-Methoden in ERP-Systemen weisen diese weiterhin Schwachstellen im Hinblick auf Planungsgüte und -umfang auf. Diesem Umstand wird seit den 1990er Jahren mithilfe von Zusatzmodulen/-funktionen begegnet. So wird der durch das zunehmende Outsourcing aufkommende Bedarf an unternehmensübergreifenden, kooperativen Planungen durch „Supply Chain Management“ (SCM) Systeme, die auf ERP-Systemen aufsetzen, adressiert, um die gesamte Wertschöpfungskette effizient zu gestalten. Ebenso entstanden Ende der 1990er Jahre „Customer Relationship Management“ (CRM) Systeme zur Unterstützung der Kundenpflege, die unter anderem für eine bessere Planbarkeit der Kundenbedarfe sorgen. Um die Planungsfunktionalität zu verbessern, werden seither zudem diverse „Advanced Planning and Scheduling“ (APS) Systeme hervorgebracht, die anstelle der bislang sukzessiven Planung unterschiedlicher Ressourcentypen (z. B. Material, Maschinen, Personal) in der Lage sind, diese simultan zu planen. Dies erübrigt zahlreiche Neuberechnungen anfänglicher Planungsschritte. Diese sind bei der sukzessiven Planung erforderlich, wenn Ergebnisse aus vorangegangenen Planungsebenen als Restriktionen in nachfolgende Schritte eingehen und dort zur Unlösbarkeit führen. Zudem ist dabei nicht sichergestellt, dass ein Gesamtoptimum der Einplanung aller Ressourcen gefunden wird. [5, 47, 49, 50]

### **Aachener PPS-Modell**

Obwohl Verbesserungen in den Funktionalitäten kontinuierlich forciert werden, basiert die PPS-Methodik weiterhin auf dem ursprünglichen MRP und MRP II [47, 48]. Über die Jahre hat sich hierbei ein Modell herausgebildet, das die Methodik der PPS unabhängig von eingesetzten Lösungsverfahren oder Zusatzmodulen beschreibt. Entlang dieses „Aachener Modells“ nach SCHUH/STICH [51] erfolgt nach wie vor in einem Großteil der Unternehmen die PPS. In Bild 12 ist die Grundstruktur dieses Modells in einer erweiterten Aufgabensicht dargestellt, aus der auch die sukzessive Abarbeitung der einzelnen Kernaufgaben hervorgeht. Zudem beinhaltet das Modell eine hierarchische Struktur, wodurch bei längerfristigen Planungshorizonten aufgrund der schlechteren Prognostizierbarkeit mit aggregierten Daten und Informationen gearbeitet wird, welche sich erst im Zeitverlauf für kurzfristigere Planungsaufgaben konkretisieren [48]. Daher ist es

## 2 Identifikation von Handlungsbedarfen in der betriebsbegleitenden simulationsgestützten Optimierung

auch nicht zielführend, alle Stufen simultan zu planen, was aber für Planungsstufen gleicher Fristigkeit dennoch empfehlenswert ist.

Die Hervorhebungen in Bild 12 zeigen auf, für welche PPS-Aufgaben bei der KS-Herstellung die größten Potenziale hinsichtlich Effizienz in den Abläufen mithilfe von IT-gestützten Optimierungsverfahren gehoben werden können. Hierauf wird entsprechend der Fokus der Untersuchungen gelegt. Dieser Untersuchungsfokus ist sowohl aus den durchgeführten Fallstudien abgeleitet als auch der Charakterisierung der Auftragsabwicklung eines Lagerfertigers in [51] entlehnt.

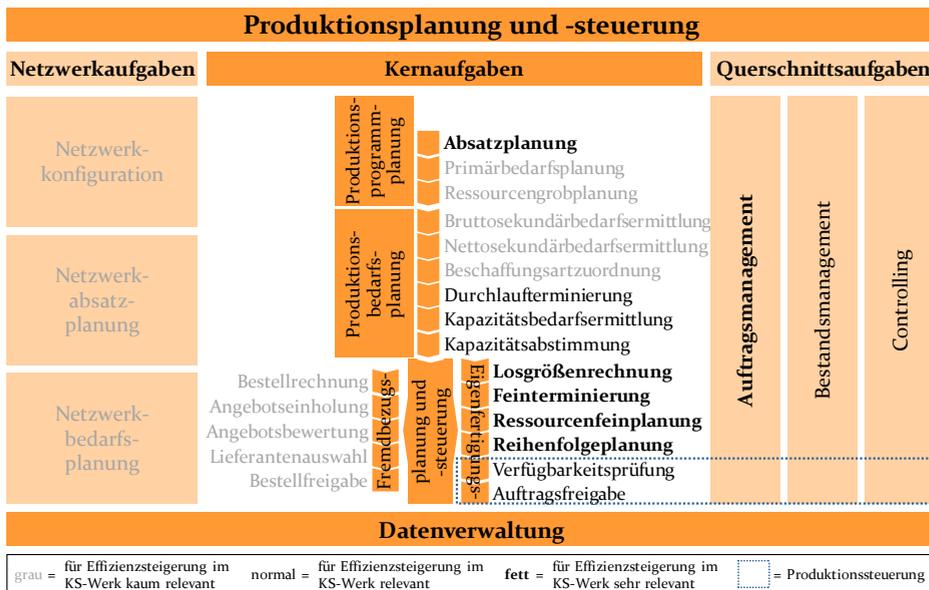


Bild 12: Aufgaben der PPS nach dem Aachener Modell i. A. a. [51]

Aufgrund des saisonalen Geschäfts in der Baubranche wird bei KS-Herstellern weitgehend auf Basis von Absatzprognosen produziert und Kundenaufträge werden aus dem Fertigwarenlager erfüllt, was die Einordnung als Lagerfertiger rechtfertigt. Ausgegraut sind entsprechend diejenigen Planungsstufen, die nur wenig Relevanz für die operative Effizienz im KS-Betrieb besitzen. So wird die Netzwerkplanung nicht berücksichtigt, da nur werksinterne Prozesse zu optimieren sind. Ebenso wird das Bestandsmanagement aufgrund der Entkopplung der Herstellung durch das Lager, genauso wie das Controlling, nur am Rande betrachtet.

Zugeschnittene Verfahren zur Absatzplanung werden einschließlich ihres Leistungsvermögens in Abschnitt 2.2.2 vorgestellt. Für die Planungsstufen

Losgrößenrechnung, Feinterminierung sowie Ressourcenfein- und Reihenfolgeplanung hält Abschnitt 2.2.3 geeignete Simultanplanungskonzepte sowie Lösungsverfahren (Abschnitt 2.2.4) bereit. Wie man die Performanz der vorgestellten Verfahren schließlich durch Simulationsunterstützung weiter erhöhen kann, ist in Abschnitt 2.2.5 dargelegt. Im darauffolgenden Abschnitt 2.3 werden Einsatzmöglichkeiten von Simulationstools vorgestellt, die insbesondere bei der Planung der Produktionsbedarfe, der Produktionssteuerung und dem Auftragsmanagement unterstützen können.

## Produktionssteuerung

Trotz ihrer hohen Relevanz, da insbesondere kurzfristig auftretende Ereignisse reaktionsschnelle Eingriffe im Planungsstand erfordern, spielt die Produktionssteuerung im Aachener Modell eine untergeordnete Rolle (vgl. Bild 12). Unter Einbezug weiterer Literaturquellen [52, 53] lassen sich die Hauptfunktionen aus Bild 13 der Produktionssteuerung direkt zuschreiben.

<b>Verfügbarkeitsprüfung</b>	Überprüfung auf Vorliegen von benötigten Materialien, Fertigungshilfs-, Betriebsmitteln und Personal zum erforderlichen Termin
<b>Auftragsfreigabe und -verteilung</b>	Festlegung des Bearbeitungsbeginns eines Auftrags und Reservierung des benötigten Materials abhängig von Terminen, Bestand oder Auslastung
<b>Werkstattsteuerung/Reihenfolgebildung</b>	Eingliederung eines Auftrags in die Warteschlange eines Arbeitssystems priorisiert nach definierten Kriterien (z. B. FIFO, geringster Restschlupf)
<b>Auftrags- und Ressourcenüberwachung</b>	Gegenüberstellung des Bearbeitungsfortschritts mit der Planung und Bewertung von Qualitätsparametern und Ressourcenverfügbarkeiten

Bild 13: Hauptfunktionen der Produktionssteuerung nach [52, 53]

Ein zentraler Punkt in der Produktionssteuerung ist neben der Auslösung von Fertigungsaufträgen die möglichst optimale, bedarfsgerechte Reaktion auf kurzfristige Abweichungen von der Planung. Diese Fähigkeit wird üblicherweise durch den Einsatz von „Manufacturing Execution Systemen“ (MES) erreicht, welche in VDI-Norm 5600 [54] detailliert charakterisiert sind und vornehmlich folgende Komponenten umfassen [5]:

- Produktions- und Maschinendatenerfassung (PDE/MDE): Erfassung und Bereitstellung von Daten, die den aktuellen Zustand der Produktion in einem individuell festgelegten Detailgrad abbilden.
- Fertigungsfeinsteuerung: sehr kurzfristige (in der Regel Stunden bis Sekunden) Planungs-, Steuerungs- und Überwachungsfunktionen für die Fertigung angeknüpft an die PPS-Funktionen des ERP-Systems.
- Qualitätssicherung (QS): Vorgaben/Pläne, Dokumentation und Auswertung der Qualität des Produktionsoutputs.

Daneben sind häufig weitere Module wie Personal-, Energiemanagement oder Leistungsanalysen integriert. Erst seit Anfang des 21. Jahrhunderts werden diese Komponenten in MES gebündelt. Zuvor lagen sie in eigenständigen Programmen vor. Dennoch stehen bis heute MES nur in wenigen Unternehmen in vollumfänglicher Form zur Verfügung. Häufiger existieren einzelne Komponenten aus dem gesamten Funktionsbündel. Auch KS-Werke sind oft nur rudimentär mit derartigen Systemen ausgestattet. [5, 49, 54, 55]

Die Feinsteuerung der Produktion als eine der Hauptfunktionen des MES und die Reaktion bei Auftreten von Planabweichungen erfolgten lange Zeit rein manuell. Bedingt durch die fortwährende Zunahme von Rechnerleistung und die damit verbundene Integration von APS-Verfahren können seit Ende der 1990er Jahre solche Eingriffe automatisiert erfolgen [49, 56]. Im Zuge der Digitalisierung verbessert sich hierbei die Lösungsgüte aufgrund des zunehmenden Umfangs an Produktions- und Maschinendaten und des schwindenden Zeitversatzes bis zu deren Verfügbarkeit [57].

Dennoch sind nicht alle automatisch errechneten Umplanungen im operativen Einsatz zielführend, beispielsweise wenn abhängige Vorlaufprozesse (z. B. Rüstvorbereitung, Materialbereitstellung) bereits angelaufen sind. Zudem ist gemäß den „Lean Prinzipien“ nach LIKER [58] Unausgeglichenheit (*Mura*) zu vermeiden und entsprechend für eine Beruhigung der Produktionsabläufe zu sorgen. Daher sollten Umplanungen auf ein Minimum reduziert und nur bei Bedarf Änderungen vorgenommen werden. VIEIRA ET AL. [59] stellen hierzu verschiedene Rescheduling-Strategien gegenüber, woraus eine für den Anwendungsfall geeignete Variante einzusetzen ist. Zur Kategorisierung bestehender Forschungsarbeiten in Bezug auf solche algorithmisch oder heuristisch rechnenden (s. a. Abschnitt 2.2.4), reaktiven Optimierungsmodelle wird in [59] das in Tabelle 2 dargestellte Kategorisierungsschema abgeleitet. Die farblichen Hervorhebungen beziehen sich auf die Einordnung der entwickelten Methodik in Abschnitt 5.1.1.

Solche immer weiter entwickelten, rechnergestützten Optimierungsverfahren liefern dennoch in vielen Fällen keine nennenswerten Verbesserungen hinsichtlich der Effizienz in der Ressourcennutzung, da die Berechnungen weiterhin modellbasiert erfolgen und aufgrund dieser Abstraktion entscheidende Einflussgrößen oft unberücksichtigt bleiben. Ebenso werden durch die zugrundeliegenden statischen Modelle dynamische Zusammenhänge vernachlässigt. Diese Nachteile kann der Mensch zu einem gewissen Grad kompensieren, er scheitert jedoch meist bei komplexeren Systemen mit Wechselwirkungen zwischen einzelnen Komponenten, wobei diese

Schwierigkeiten durch den zeitdynamischen Kontext verstärkt werden. Aus diesem Grund soll der Mensch zunehmend aus dem Entscheidungsprozess entfernt werden, indem dieser Prozess stärker automatisiert wird. Dieses Übergehen des menschlichen Ermessens trug jedoch in den 1980er Jahren neben der unzureichend entwickelten Informationstechnik zum Scheitern der „Computer Integrated Manufacturing“ (CIM)-Bestrebungen bei [1, 4, 5]. Hierbei sollte die PPS mit weiteren Werkzeugen zur Produkt- und Prozessentwicklung bis hin zur Produktionsausführung integriert werden. [60-62]

Tabelle 2: Kategorisierungsschema für reaktive Optimierungsmodelle i. A. a. VIEIRA ET AL. [59]

Auftragsumgebung				
Statisch (vorgegebener Auftragshorizont)		Dynamisch (kontinuierlicher Fluss an Aufträgen)		
Deterministisch	Stochastisch	Zyklischer Auftrags- fluss	Abweichungen in Ankunfts- zeiten	Prozess- flussvaria- bilität

Optimierungsstrategie				
Dynamisch (ohne Planerzeugung)		Prädiktiv-reaktiv (mit Planerzeugung)		
		Optimierungsverfahren		
Einsatz von Prioritätsregeln	Einsatz einer Kontrollheuristik	Periodisch	Ereignisbasiert	Hybrid

Optimierungsmethode				
Planerzeugung		Plananpassung		
Nominaler Produktions- plan	Robuster Produktions- plan	Right-Shift- Heuristik	Partielle Optimierung	Komplette Optimierung

Um folglich die Unzulänglichkeiten und begrenzten Kapazitäten des Menschen auszugleichen, aber weiterhin auf dessen Kompetenzen zurückzugreifen, können Simulationswerkzeuge eingesetzt werden. Sie entlasten und unterstützen Entscheider, indem sie komplexe Abläufe im Modell abbilden, verschiedene Szenarien gegenüberstellen, Abläufe im Zeitverlauf analysieren und diese visualisieren. Zusätzlich zu den aufgeführten Vorteilen generiert die Simulation durch weitere Einsatzmöglichkeiten zusätzlichen Nutzen, was in Abschnitt 2.3 umfassend behandelt wird. Somit ist eine Integration der drei Faktoren Mensch, Optimierung und Simulation erforderlich, um auf kritische Einflüsse auf die geplante Produktion ziel führend zu reagieren (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Erfüllung von Anforderungen an eine reaktive Produktionssteuerung durch Optimierungs- und Simulationsverfahren sowie menschliche Einflussnahme

	Optimierung	Mensch	Simulation
Ermittlung optimaler Lösungen	●		
Beherrschung hoher Komplexität	●		●
Analyse dynamischer Systeme			●
Bewertung verschiedener Szenarien		●	●
Spontane Berücksichtigung zusätzlicher Einflussfaktoren		●	

Trotz ihrer langen Historie unterliegt die PPS aufgrund sich kontinuierlich wandelnder Rahmenbedingungen in der Produktion noch heute intensiven Forschungsbemühungen. Besonders im Kontext der Industrie 4.0 sind aufgrund der zunehmenden Komplexität neue Planungs- und Steuerungsansätze erforderlich, die verstärkt auf die Koordination von dezentral gesteuerten, autonom agierenden Cyber-Physischen Systemen (CPS) ausgerichtet sein werden [1, 57, 63, 64]. In derartigen Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS) wird einer hohen Datenverfügbarkeit und -qualität ein immer höherer Stellenwert beigemessen, um stets auf dem aktuellen Stand der Produktion aufzusetzen und die den Daten immanenten Informationen als Entscheidungsunterstützung zu nutzen [65]. Darüber hinaus kommen zunehmend Verfahren der künstlichen Intelligenz [66, 67] sowie selbstoptimierende Systeme [68, 69] zur Anwendung, die selbstständig auf veränderte Rahmenbedingungen reagieren können und somit den Nachteil des statischen Charakters von PPS-Systemen ausräumen. Im Zuge der Energiewende kamen verstärkt Forschungsbestrebungen zur energieflexiblen PPS auf [70-72], deren Anspruch es ist, die Produktionsabläufe in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Energie aus regenerativen Quellen oder ausgerichtet an deren Marktpreis zu steuern. Übergreifend laufen seit einigen Jahren Forschungsarbeiten, um die lange Zeit vornehmlich zur Fertigungsplanung verwendete Materialflusssimulation operativ als Hilfsmittel für die PPS einzusetzen [73-76, P5]. Dieser Einsatzzweck sowie die einhergehenden Herausforderungen sind im Folgenden ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit.

### 2.2.2 Verfahren zur Absatzplanung als Basis für die Planung des Produktionsprogramms

Am Beginn der PPS steht die Absatzplanung als Komponente der Produktionsprogrammplanung (vgl. Bild 12). Sie zielt auf eine möglichst genaue

Vorhersage der Absatzmengen für festgelegte Planungszeiträume als Rechenbasis für die weiteren Planungsmodule aus Bild 12 ab. Aufgrund der Abhängigkeit von diversen Einflussfaktoren (z. B. Konjunktur, Konkurrenz, personenabhängige Entscheidungen, Wechselwirkungen zwischen Produkten) sind Absatzplanungen mit hoher Unsicherheit behaftet. Der damit einhergehenden Komplexität bei der Bestimmung zukünftiger Absatzmengen [49] kann daher vom Menschen selbst allenfalls mit Intuition, nicht aber analytisch begegnet werden, was den Einsatz von IT-Unterstützung nahelegt.

Die Absatzplanung weist sowohl für das auf menschlichem Wissen aufbauende (qualitativ) als auch das analytische Vorgehen (quantitativ) verschiedene Verfahrensweisen auf. Gängige Methoden sind in Bild 14 aufgeführt und charakterisiert. Für weitere Erklärungen sei auf [77-82] verwiesen.

Prognoseverfahren zur Absatzplanung	qualitativ	Prognost. Befragung	Individuelle Schätzung der Absatzmenge durch Vertriebsmitarbeiter, Kunden, Management etc. und Zusammenführung der Ergebnisse		
		Delphi-Methode	Fragebögen über mehrere Runden an gleichen Personenkreis, wobei Ergebnisse aus vorherigen Runden die neuen Fragebögen ergänzen.		
		Szenario-Technik	Zunächst Prognose einer absehbaren Entwicklung und unvorhersehbarer Ereignisse aufbauend auf einer Analyse der Ausgangssituation und Systemzusammenhänge. Anschließend Synthese in generierten Szenarien mit Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten.		
	quantitativ	Zeitreihenprognose (Extrapolation)	Zeitregression	Extrapolation einer Zeitreihe durch einfache (lineare) Regression mit der Zeit als unabhängige Variable	
			Glättungsverfahren	Aus einer festgelegten Anzahl an Vergangenheitswerten einer Zeitreihe wird z.B. durch exponentiell gewichtete Mittelwertbildung ein Folgewert ermittelt, der im nächsten Iterationsschritt in die Berechnung einbezogen wird, um die Zeitreihe fortzuschreiben (z.B. gleitender Mittelwert, exponentielle Glättung).	
			Autoregressive Methoden	Verschiedenartige Kombinationen der Regressions- und gleitenden Mittelwertverfahren (z.B. ARMA-, ARIMA-, SARIMA-Modelle). Hierbei wird jeder Wert als lineare Kombination vorheriger Werte und dem Fehler in der jeweiligen Schätzung errechnet.	
		Kausale Verfahren	Prognose von Absatzmengen, die von verschiedenen, teils korrelierenden Variablen abhängen, durch geeignete Verknüpfung von deren jeweiligen Zeitreihen (z.B. mittels multivariater Regression, ökonomischer Verfahren, neuronaler Netze).		

Bild 14: Gängige Prognoseverfahren zur Absatzplanung nach [77-82]

Qualitative Verfahren werden vornehmlich verwendet, wenn keine passenden Zeitreihen vorliegen oder deren Aussagekraft nicht ausreichend ist, beispielsweise bei neuen Produkten oder plötzlich auftretenden Nachfrageänderungen [81]. Um subjektive Beeinflussungen auszuschließen und

vergangene Absatzmuster sowie stochastische Einflüsse formal und automatisiert einfließen zu lassen, werden quantitative Verfahren herangezogen [80]. Hierbei sind allerdings nicht notwendigerweise alle Einflussfaktoren berücksichtigt. Damit individuelle Schwachstellen beider Verfahren ausgeschlossen werden, empfiehlt es sich daher, subjektive und objektive Methoden in Kombination einzusetzen [51, 80, 83]. Der sechsstufige Absatzplanungsprozess nach KILGER/WAGNER [84] enthält drei relevante Schritte zur Durchführung dieser kooperativen Absatzplanung für KS-Unternehmen:

1. Rechnerische Prognose mittels statistischer Methoden (quantitativ)
2. Korrektur der statistischen Prognose durch subjektive Vorausschau (qualitativ)
3. Gemeinschaftliche Abstimmung aller Interessensgruppen zur Einigung auf eine Absatzprognose als Basis für weitere Prozesse

Absatzmengen für Kalksandsteine unterliegen saisonalen Schwankungen, sind oft trendbehaftet und besitzen anteilig nicht erklärbare Mengenänderungen. Da exogene Einflussfaktoren nur aufwändig quantifizierbar sind, sind kausale Verfahren im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit gegenüber univariaten Verfahren unterlegen, weshalb der Einsatz des Zeitfaktors als Ersatzgröße für andere kausale Faktoren gerechtfertigt ist (vgl. [85]). Bei entsprechender Nutzung von Zeitreihen empfehlen sich – besonders um saisonale Schwankungen einzubeziehen – autoregressive Verfahren [80].

Entsprechend stellen sogenannte SARIMA-Modelle nach BOX UND JENKINS [79], welche gemeinhin die Basis für die Prognose von Absatzmengen unter Einsatz von neuronalen Netze bilden [80], geeignete Verfahren für KS-Unternehmen dar. Sie basieren auf ARMA-Ansätzen, welche autoregressive („AR“) und Moving-Average-Funktionsterme („MA“) zur Zeitreihenanalyse verwenden. Um in diesen stationären Modellen auch Trends berücksichtigen zu können, leitet man trendbehaftete Zeitreihen mehrmals ab und arbeitet somit mit integrierten („I“) ARMA-Modellen, welche ARIMA-Modelle genannt werden. Diese können um die Berücksichtigung von saisonalen Komponenten („S“) erweitert werden, indem das ARIMA-Modell des nicht-saisonalen Anteils der Zeitreihe multiplikativ mit einem ARIMA-Modell des saisonalen Anteils verknüpft wird. Man bezeichnet diese als SARIMA-Modelle. [79, 80, 86, 87]

Liegen Zeitreihen über vergangene Absatzmengen vor, so können daraus unter Angabe des Saisonfaktors  $s$  geeignete Werte für die Modellparameter (s. Tabelle 4) für ein entsprechendes  $SARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$ -Modell errechnet werden. Diese lassen sich über regelbasierte Verfahren mittels

Autokorrelationsfunktion (ACF) und partieller Autokorrelationsfunktion (PACF) bestimmen. Ist nicht ausreichend Wissen über die Modellierung vorhanden, können auch automatische Selektionsverfahren eingesetzt werden, die die Parameterwahl anhand von Informationskriterien wie dem Akaike- (AIC) oder dem Bayesschen Informationskriterium (BIC) ausführen [77, 88]. So lassen sich auch derartige, komplexe Prognoseverfahren in der Praxis anwenden.

Tabelle 4: Parameter eines SARIMA( $p, d, q$ )  $\times$  ( $P, D, Q$ ) $_s$ -Modells

Parameter	Bedeutung
$p$	Grad der nicht-saisonalen Autoregression (AR)
$d$	Grad der nicht-saisonalen Differenzierung (I)
$q$	Ordnung des nicht-saisonalen gleitenden Durchschnitts (MA)
$P$	Grad der saisonalen Autoregression (AR)
$D$	Grad der saisonalen Differenzierung (I)
$Q$	Ordnung des saisonalen gleitenden Durchschnitts (MA)
$s$	Anzahl der Zeitreihenwerte pro Saison (z. B. $s = 12$ bei Monatswerten als Zeitreihe und ein gesamtes Jahr als Saison)

Diese Verfahren können für Produkte mit regelmäßigem Absatz über den Planungshorizont angewandt werden. Für exotische Produktvarianten, die nur sporadisch in geringen Mengen und zu zufälligen Zeitpunkten abgesetzt werden, sind spezifische Verfahren zu verwenden [84]. In KS-Unternehmen fließen solche Varianten häufig nur dann in das Produktionsprogramm ein, wenn der Vertrieb einen entsprechenden Bedarf aus bekannten Bauvorhaben meldet, der nicht aus dem Lagerbestand gedeckt werden kann.

### 2.2.3 Scheduling-Probleme zur simultanen Mengen-, Termin-, Kapazitäts- und Reihenfolgeplanung

Auf Basis eines über die relevanten Fachbereiche des Unternehmens abgestimmten Absatzplans, der nach Abgleich mit den Lagerbeständen die zu fertigen Stückzahlen aller Artikel für einen Planungszeitraum mit Fälligkeitsterminen festlegt, fährt die PPS eines Lagerfertigers nach der Materialbedarfsplanung gemeinhin mit der Durchlaufterminierung und Kapazitätsplanung fort. Diese sukzessive Vorgehensweise offenbart jedoch Defizite, weil Ergebnisse aus frühen Planungsphasen zur Unmöglichkeit der Planerstellung in späteren Phasen führen können [89]. Mit der Etablierung von APS-Systemen traten daher hierarchische und insbesondere simultane Planungsverfahren hervor, die durch Rückkopplung beziehungsweise

gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer Einflussfaktoren Interdependenzen (s. Bild 15) direkt einfließen lassen und so unmögliche Planvorgaben verhindern [49, 60, 90].

Dieses Vorgehen hat sich auch in der der KS-Herstellung nahen Prozessindustrie etabliert, da auch hier durch die direkte Verkettung aufeinanderfolgender Prozesse ohne flexible Zwischenpuffer starke Interdependenzen auftreten [91-93]. So bietet es sich an, gemäß dem APS-Modul für Losgrößen- und Ablaufplanung nach MEYR ET AL. [90, 94] die Losgrößenrechnung, Feinterminierung, Ressourcfeinplanung und Reihenfolgeplanung in einem simultanen Planungsmodell zu integrieren [87]. Ein derartiges Modell lässt sich den sogenannten Scheduling-Problemen zuordnen.

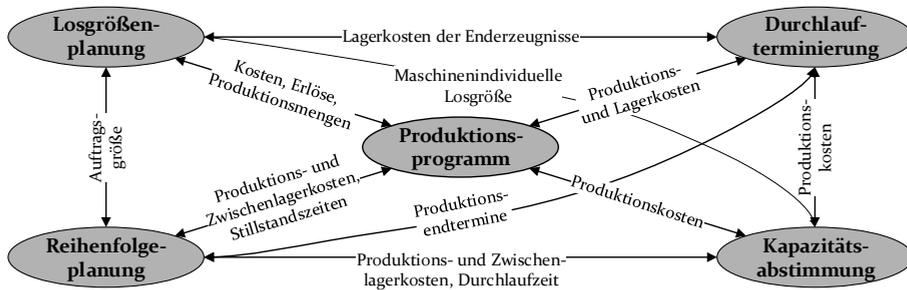


Bild 15: Interdependenzen zwischen Planungsebenen der PPS i. A. a. [89]

Unter Scheduling-Problemen versteht man Optimierungsmodelle, die  $n$  Aufträge oder Jobs systematisch  $m$  Maschinen zeitlich zuordnen, um unter Berücksichtigung von Restriktionen eine Zielfunktion  $z(x)$  zu optimieren [95-99]. Damit lässt sich das Problem der Ablauf- und Losgrößenplanung abbilden, indem gegebene Absatzmengen in einem Planungszeitraum auf vorliegenden Maschinen unter Beachtung von deren Kapazitäten überschneidungsfrei terminiert werden. Sie können hierbei auch zur Erreichung optimaler Losgrößen gesplittet werden. Nach GRAHAM ET AL. [100] können Scheduling-Probleme durch Repräsentation als Tripel  $\alpha | \beta | \gamma$  kategorisiert und generalisiert werden (s. Bild 16), sodass allgemeingültige Untersuchungen zu deren Komplexität angestellt werden können (s. Abschnitt 2.2.4).

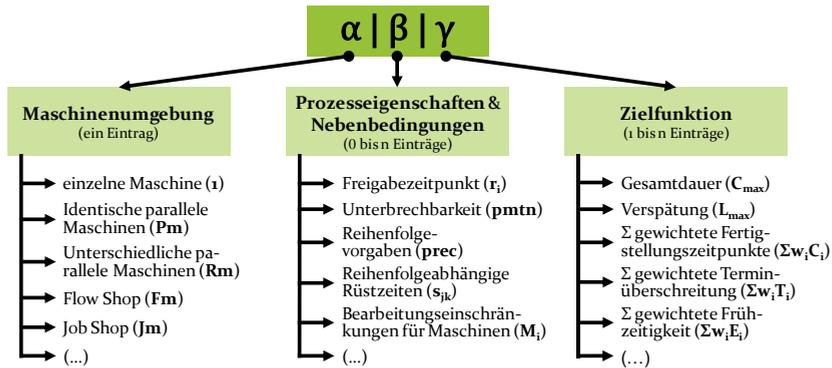


Bild 16: Klassifizierung von Scheduling-Problemen nach Graham et al. [100] (Darstellung i. A. a. Pinedo [96])

Für die Losgrößenbestimmung in einem KS-Werk besitzt einzig der Verdichtungsprozess an den Pressen Relevanz. Denn nur dort liegen Werkzeugmaschinen mit hohem Rüstaufwand vor. Das Mischen der Rohstoffe erfolgt zwar auch in Chargen, jedoch liegt hierbei die optimale Chargengröße bei der oberen Kapazitätsgrenze des Mixers. Ebenso geschieht die Autoklavierung chargenweise, jedoch sind dort keine Rüstvorgänge erforderlich. Dennoch beeinflusst der Härteprozess die Losgrößenbildung an den Pressen, indem bei sortenreiner Beladung die Losgröße immer ein Vielfaches der maximalen Härtekesselkapazität für das entsprechende Format ergeben muss, beziehungsweise bei gemischter Beladung ein Vielfaches der Härtewagenkapazität. Andererseits beeinflusst die festgelegte Terminierung und Losgröße an den Pressen aufgrund der direkten Verkettung die nachfolgenden Prozessschritte des Härstens und der Verpackung. So können beispielsweise Engpasssituationen eintreten, wenn auf mehreren Pressen zeitgleich KS-Sorten mit kurzer Taktzeit gefertigt werden.

Für die Modellierung von Optimierungsproblemen zur Losgrößen- und Ablaufplanung, die auf eine Minimierung der gegenläufigen Rüst- und Lagerkosten bei Erreichung einer vorgegebenen Ausbringungsmenge abzielen, existieren zahlreiche Varianten. Sie eignen sich abhängig von verschiedenen Parametern (z. B. Anzahl Produktionsstufen, Anzahl zeitgleich zu optimierender Produkte, Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen) für bestimmte Probleminstanzen und lassen sich gemäß Bild 17 kategorisieren. Der relevante Pfad für das Pressen von KS, das als einstufiges Optimierungsmodell (s. Abschnitt 4.2.2) in eine mehrstufige simulationsgestützte Optimierung (s. Abschnitt 4.1.3) eingebettet wird, ist darin farblich hervorgehoben und mit exemplarischen Problemformulierungen versehen.

2 Identifikation von Handlungsbedarfen in der betriebsbegleitenden simulationsgestützten Optimierung

Zahl der Produktionsstufen	einstufig	mehrstufig		
Ressourcenanzahl	eine Ressource	mehrere Ressourcen		
Informationsgrad	deterministisch	stochastisch		
Bedarfsverlauf	statisch	dynamisch		
Zahl der Produkte	Ein-Produkt-Fall	Mehr-Produkt-Fall		
Kapazitäten	unrestringiert	restringiert		
Periodenlänge	Makroperioden	Mikroperioden	Hybride	
	CLSP	DLSP	PLSP	CSLP

Bild 17: Kategorisierung von Modellierungsansätzen zur Ablauf- und Losgrößenplanung (i. A. a. [101-104])

Im Bereich der einstufig, dynamischen Mehr-Produkt-Modelle mit Kapazitätsbeschränkungen existieren vornehmlich Untersuchungen zu folgenden Problemformulierungen:

- CLSP: Capacitated Lotsizing Problem [105]
- DLSP: Discrete Lotsizing and Scheduling Problem [106, 107]
- CSLP: Continuous Setup Lotsizing Problem [108, 109]
- PLSP: Proportional Lotsizing and Scheduling Problem [110, 111]
- GLSP: General Lotsizing and Scheduling Problem [112]

Diese Ansätze unterscheiden sich durch ihre Restriktionen hinsichtlich der Anzahl an möglichen Rüstvorgängen (in Mikro-Perioden ist maximal ein Rüstvorgang erlaubt), sowie DLSP, CSLP und PLSP zusätzlich anhand der erlaubten Rüstzeitpunkte. Das GLSP stellt ein Hybrid-Modell dar, das sich aus den Mikro- und Makro-Modellen zusammensetzt, um reihenfolgeabhängige Rüstzeiten zu berücksichtigen. Hierzu werden Bedarfe und Lagerkosten als Rahmenbedingungen auf Makroebene erfasst und anschließend die Losgrößen auf Basis der beliebig langen Mikroperioden errechnet. Die konkreten Unterschiede der Modellierungsansätze in Bezug auf die Belegungsrestriktionen für die einzelnen Perioden (z. B. Umrüsten nur zu Beginn einer Periode, maximale Anzahl an Umrüstungen pro Periode, feste Periodenlängen, periodenübergreifende Lose, unterbrochene Lose) sind in Bild 18 dargestellt. [105-112]

Zur Anwendung in KS-Unternehmen bieten sich GLSP an, da die vorherrschenden reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten berücksichtigt werden können. Nach der Festlegung auf einen passenden Modellierungsansatz ist ein geeignetes Lösungsverfahren zu finden, um die optimalen Losgrößen zu errechnen (s. hierzu Abschnitt 4.2.2).

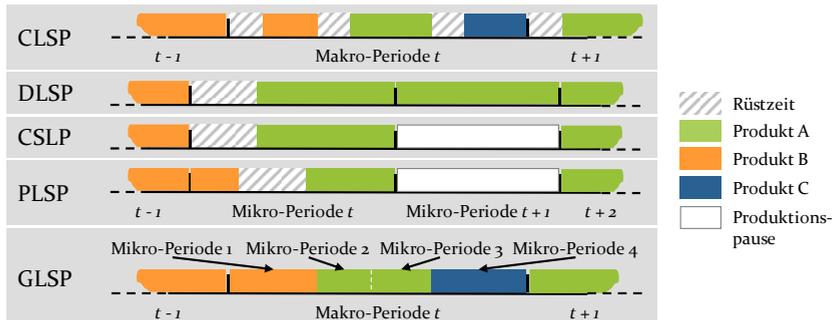


Bild 18: Spezifische Periodeneinteilungen für einstufige, dynamische Mehr-Produkt-Modelle zur Ablauf- und Losgrößenplanung [105-112]

### 2.2.4 Exakte Algorithmen und heuristische Optimierungsmethoden

Ist für ein Optimierungsproblem ein passender Modellierungsansatz gewählt und das spezifische Modell formuliert, so ist im nächsten Schritt ein geeignetes Lösungsverfahren zu identifizieren. Diese unterscheiden sich grundsätzlich in ihrer Vorgehensweise zur Lösungsfindung. Exakte mathematische Verfahren (z. B. vollständige Enumeration, Branch&Bound-, Branch&Cut-Verfahren) sind in der Lage, die tatsächlich beste Lösung zu finden, sofern eine solche existiert [113]. Sie sind jedoch schon bei vergleichsweise kleinen Problemgrößen mit sehr langen Rechenzeiten verbunden. Hingegen versuchen heuristische Verfahren (z. B. Greedy-Algorithmen, Lagrange-, Dekompositions- und Metaheuristiken<sup>3</sup>) möglichst zügig eine zulässige Lösung zu finden, die nahe an einer optimalen Lösung liegt, und diese weiter zu verbessern [114, 115]. Den Nachteil in der Lösungsgüte kompensieren Heuristiken durch eine vergleichsweise hohe Geschwindigkeit der Lösungsfindung. [113]

Die Festlegung auf ein exaktes oder ein heuristisches Verfahren hängt in Abwägung des Zielkonflikts zwischen Lösungsgüte und Rechenzeit von der Komplexität des zugrundeliegenden Optimierungsproblems ab. Der Begriff Komplexität bezieht sich in diesem Kontext auf die Effizienz von Lösungsalgorithmen für kombinatorische Optimierungsprobleme (s. a. [116]). Diese Komplexitätstheorie stellt ein eigenes Forschungsgebiet dar, für das wesentliche Werke in [98, 117-119] vorliegen. Zur Bestimmung der Komplexität von Optimierungsproblemen werden diese soweit verallgemeinert,

<sup>3</sup> Sehr verbreitete Metaheuristiken sind Simulated Annealing, Threshold Accepting, genetische Algorithmen u. a.

dass man sie Klassen zuordnen kann, von denen bekannt ist, ob sie mit deterministischen Algorithmen in einer durch ein Polynom der Problemgröße beschränkten Laufzeit (= „in Polynomialzeit“) lösbar sind. Ist dies nicht der Fall und gibt es allenfalls nicht-deterministische Algorithmen, die solche Probleme in Polynomialzeit lösen, spricht man von Problemen aus der Klasse NP oder von NP-schweren Problemen. Für NP-schwere Probleme ist bisher kein Algorithmus bekannt, der in Polynomialzeit eine Lösung liefert. Vielmehr wächst die Laufzeit eines deterministischen Algorithmus mit zunehmender Problemgröße exponentiell an.<sup>4</sup> [113]

Zu diesen NP-schweren Problemen zählt auch ein großer Teil der Scheduling-Probleme zur Losgrößenbestimmung [96], insbesondere dann, wenn Kapazitätsrestriktionen zu berücksichtigen sind [120]. So sind auch die in Bild 18 aufgeführten Modellierungsansätze dieser Problemklasse zuzuordnen. Entsprechend eignen sich hierfür Heuristiken im Regelfall besser, solange die Einbußen hinsichtlich der Optimalität in Kauf genommen werden können [60]. Für beide Arten der Lösungsverfahren gilt jedoch auch eine hohe Abhängigkeit der Lösungsgüte von der Genauigkeit der zugrundeliegenden Modellierung. So steigt im Regelfall mit zunehmender Modellpräzisierung auch die Rechenzeit an. Für diesen Zielkonflikt ist abzuwägen, an welchem Punkt ein geeigneter Kompromiss zu finden ist.

Ein Einflussfaktor auf die Modellpräzision liegt in der Berücksichtigung zeitdynamischer Wechselwirkungen zwischen einzelnen Elementen im betrachteten System (vgl. [121]). So lässt sich beispielsweise die Zusammenführung aus mehreren zu planenden Quellen zu einer gemeinsam genutzten, kapazitätsbeschränkten Ressource und eine nachfolgende Verteilung auf verschiedene Senken nur mit sehr komplexer Modellierung berücksichtigen [122]. Als Beispiel kann eine Schiebebühne in einem KS-Werk zwischen den Pressen und den Autoklaven angeführt werden. Zudem sind mathematische Modellformulierungen oft sehr rigide gegenüber Änderungen im zugrundeliegenden Prozess, was auch einen Nachteil in APS-Systemen darstellt [60]. Um dieses Defizit zu umgehen sowie die Zeitdynamik zu berücksichtigen, kann auf simulationsgestützte Optimierung zurückgegriffen werden [51, 62], bei der ein Teil des zu modellierenden Systems in eine Simulationsumgebung ausgelagert wird.

---

<sup>4</sup> Bei Reihenfolgeproblemen stellt die Problemgröße  $n$  beispielsweise die Anzahl an Objekten dar, die in eine optimale Reihenfolge gebracht werden müssen. Hierfür gibt es – unter Ausschluss von Nebenbedingungen –  $n!$  Lösungsmöglichkeiten. Das bedeutet, dass es für 5 zu sortierende Objekte 120 Möglichkeiten gibt, für 20 zu sortierende Objekte aber bereits mehr als  $2,4 \cdot 10^{18}$  Reihenfolge-Möglichkeiten.

### 2.2.5 Simulationsgestützte Optimierung

Trotz ihres früh forschungsseitig identifizierten Potenzials, die Defizite der mathematischen Optimierung zu minimieren, fand die simulationsgestützte Optimierung erst um die Jahrtausendwende mit der Integration von Algorithmen in kommerzielle Simulationstools den Weg in die Praxis [123]. Der Forschungsfokus lag lange Zeit auf der Ermöglichung von robuster Optimierung durch Simulationsanbindung (z. B. [124-126]). Später wurden auch andere Vorteile wie eine vereinfachte Modellbildung und -anpassung [121, 127], die Berücksichtigung zeitdynamischer Aspekte [73, 121] oder die Visualisierung der Ergebnisfindung [123, 128] verstärkt adressiert.

Aus den Ergebnissen der Forschung zu diversen Einsatzformen der simulationsgestützten Optimierung wurden in der VDI-Norm 3633 – Blatt 12 [129] Standards abgeleitet, die diese grundlegend in vier Kategorien hinsichtlich der Verknüpfung von Simulation und Optimierung unterteilen (s. Bild 19). Sequentielle Verfahren führen eine Komponente (Simulation oder Optimierung) komplett aus, um die Ergebnisdaten dann an die andere Komponente zu übergeben. Hingegen bestehen Verfahren mit hierarchischer Verknüpfung aus einer Hauptprozedur, die während ihrer Ausführung mehrmals die andere Anwendung zur Datenvalidierung oder -erhebung aufruft. Kategorie D ist nach [62] die in der Praxis am häufigsten eingesetzte Verknüpfungsform, bei der die Simulation als Bewertungsfunktion der Optimierung eingesetzt wird.

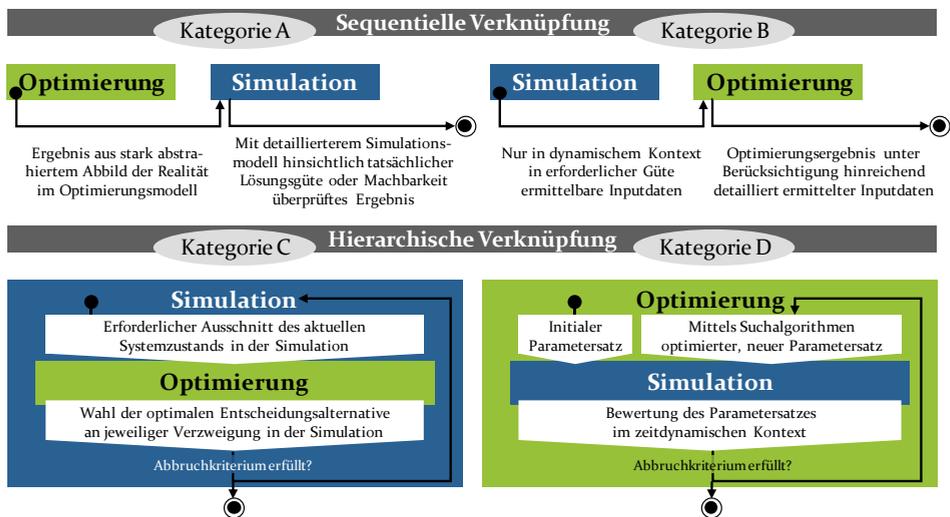


Bild 19: Kategorisierung der simulationsgestützten Optimierungsverfahren gemäß der Verknüpfung von Simulation und Optimierung (i. A. a. [129])

Die simulationsgestützte Optimierung wird sowohl als integraler Bestandteil von APS-Systemen als auch von Simulationstools genannt. In APS-Systemen liegt die Simulation neben den immanenten Optimierungsverfahren jedoch nur als „What-if-Analyse“ vor, indem ein Szenarienvergleich aus verschiedenen parametrisierten Optimierungsproblemen generiert wird (Kategorie D mit Ergebnisvergleich statt Simulation) [5, 49]. Hingegen bieten Simulationsanwendungen (Meta-)Heuristiken als integrierbare Module an [123, 130, 131] und erlauben über Schnittstellen die Anbindung weiterer Optimierungskomponenten, wie beispielsweise externer Algorithmen (Kategorie C).

Aufseiten der Forschung wird aktuell verstärkt untersucht, wie die simulationsgestützte Optimierung eingesetzt werden kann, um robuste Produktionspläne zu generieren und um zugunsten einer genaueren Abbildung der Realität mehr Einflussfaktoren zu berücksichtigen [49, 56]. Es existiert jedoch kein allgemeingültiger Lösungsansatz für den Einsatz von simulationsgestützter Optimierung. Vielmehr haben Forschungsarbeiten zum Inhalt, für einen spezifischen Anwendungsfall die passende Methodik zu ermitteln [62, 130]. So lässt sich die simulationsgestützte Optimierung bei gegebener Anbindung an erforderliche Betriebsdaten sogar ähnlich einem MES einsetzen, wobei sie sogar erweiterte Fähigkeiten (automatisiertes Rescheduling, Evaluierung von Prozessabweichungen, präziserer Input für Optimierungsverfahren durch Voraussimulation) besitzt (s. Abschnitt 5.1). Aufgrund ihrer genannten Vorteile wird sie weiter eine entscheidende beziehungsweise eine immer bedeutendere Rolle bei der Optimierung betrieblicher Abläufe spielen [56, 62, 131, 132].

### 2.3 Simulation zur effizienten Steuerung von Produktionsabläufen

Die in Abschnitt 2.2.5 kurz erwähnte Simulation von industriellen Prozessen und Systemen wird im vorliegenden Abschnitt nun präziser behandelt, um deren derzeitiges Leistungsvermögen sowie künftige Einsatzfelder beurteilen zu können. Ausgehend von einem Überblick über Modellierungsansätze und einsetzbare Verfahren in Abhängigkeit der Zielstellung, wird die in dieser Arbeit fokussierte ereignisdiskrete Materialflusssimulation (DES) tiefergehend beleuchtet. Sie eignet sich für den Einsatz bei langfristigen strategischen Zielstellungen bis hin zu kurzfristigen operativen Untersuchungen. Für letzteren Einsatzzweck ist es zielführend, das Modell stets auf dem aktuellen Stand des zugrundeliegenden Realsystems zu parametrisieren. Dieser Anforderung ist ein Abschnitt zur betriebsbegleitenden

Simulation gewidmet. Da energetische Einflussfaktoren in beträchtlichem Maße auf den Ablauf der KS-Herstellung einwirken, ist der letzte Abschnitt deren Integration in eine DES gewidmet.

### 2.3.1 Simulationsmethoden in der Wertstromoptimierung

Die computergestützte Simulation nimmt in der Produktion und Logistik seit Jahrzehnten eine bedeutende Rolle als Werkzeug zur Planung und Optimierung von komplexen Systemen ein. Sie bietet die Möglichkeit, komplizierte reale Zusammenhänge, die in einem dynamischen System oder Prozess vorherrschen, in einem experimentierbaren, digitalen Modell zu untersuchen, ohne dabei auf reale Vorgänge einzuwirken. Dennoch eignet sich die Simulation nicht nur für existierende, sondern auch zur Planung neuer Systeme, was ihren ursprünglichen Einsatzzweck darstellt. Sie ist somit im gesamten Produkt- und Anlagenlebenszyklus unter anderem für Analysen, Tests, Designgebung, Optimierung, Validierung oder Training einsetzbar. [62, 133, 134]

Während lange Zeit Themen wie die Vereinfachung und Beschleunigung der Modellerstellung und die Entwicklung passender IT-Tools im Vordergrund standen, rückt heute die Integration von innovativen Methoden aus dem Umfeld der Industrie 4.0 in den Fokus. So werden etwa die durchgängige Anpassung und Erweiterung des Modells vom Engineering über die virtuelle Inbetriebnahme bis zum operativen Einsatz [135, 136], die informationstechnische Verknüpfung mit betrieblichen Systemen zur Nutzung als digitaler Zwilling [1, P6], die Kopplung verschiedenartiger Simulationsverfahren (*hybride Simulation*) [137, 138] oder die Integration von maschinellen Lernverfahren [139-141] intensiv beforscht. Für die kommenden Jahre wird ferner der Beschleunigung von Simulationsläufen beispielsweise durch parallelaufende Rechenprozesse (*parallel computing*) oder Quantencomputer, der intensiveren Untersuchung von Verknüpfungsmöglichkeiten zwischen mathematischer Optimierung und Simulation (*simheuristics*) oder tiefergehenden Analysen von simulationsgenerierten Massendaten (*simulation analytics*) ein hoher Stellenwert zugerechnet [142].

Zur Durchführung von Simulationen ist zunächst die Realität durch Reduktion auf die zur Zielerreichung relevanten Bestandteile (= Abstraktion) in ein Modell zu überführen. Hierbei lassen sich gemäß Tabelle 5 verschiedene Modellierungsansätze unterscheiden. Einerseits kann das Verhalten von Systemen zu bestimmten Zeitpunkten (statisch) oder im Zeitverlauf (dynamisch) betrachtet werden. Hierbei können entweder zufällige Einflüsse berücksichtigt werden (stochastisch), oder ein deterministisches

Verhalten abgebildet sein. Bezüglich der Prozessmodellierung kann feiner unterschieden werden. So ändern sich einerseits Zustände zu bestimmten Zeitpunkten in beliebigen Abständen sprunghaft (ereignisdiskret), andererseits passen sie sich fließend mit in konstanten, minimalen Zeitschritten variierenden Flussraten an (kontinuierlich). Ändern sich diese Raten ereignisbasiert, sodass Zeitschritte unterschiedlicher Länge vorliegen, spricht man von Discrete-Rate-Modellen [143], die auch um ereignisdiskrete Zustandsänderungen ergänzt sein können (mesoskopisch). Es ist jedoch nicht gegeben, dass der Modellierungsansatz stets der zugrundeliegenden Systemcharakteristik entsprechen muss. So können im Bedarfsfall auch kontinuierliche Systeme diskret modelliert werden und umgekehrt [144].

Tabelle 5: Morphologischer Kasten zur Klassifikation von Modellierungsansätzen i. A. a. [143-145]

<b>Zeitverhalten</b>	statisch		dynamisch	
<b>Zufallsverhalten</b>	stochastisch		deterministisch	
<b>Prozessmodell</b>	ereignis-diskret	meso-skopisch	discrete-rate	kontinuierlich

Neben dem Modellierungsansatz können Simulationsanwendungen auch nach der Verfahrensart charakterisiert werden (s. Bild 20). Simulationen mit mikroskopischem Betrachtungsfokus (z. B. Materialverhalten, thermisches Prozessverhalten) greifen meist auf kontinuierliche Modellierungsansätze zurück, da dynamische Prozesse und Flüsse bzw. Ströme gut mithilfe von Differentialgleichungen abgebildet werden können. Für makroskopische Problemstellungen (z. B. logistische Prozesse, Anlagenabläufe) kommen hingegen vermehrt diskrete Ansätze zur Anwendung, da hier Verhaltensänderungen zu bestimmten Zeitpunkten eintreten. Entsprechend stellt die Modellierung von fließenden Komponenten, wie Flüssigkeiten oder Schüttgut, eine besondere Herausforderung in ereignisdiskreten Materialflusssimulationen, welche generell auf Stückgutflüsse ausgelegt sind, dar [41, 145, P1].

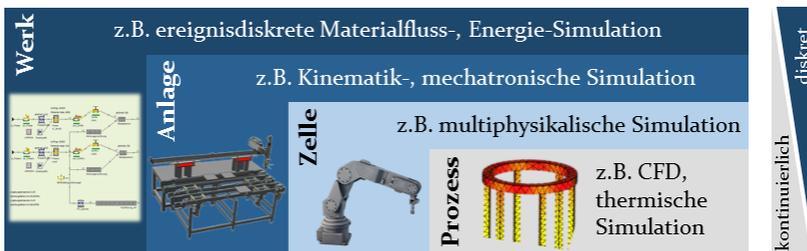


Bild 20: Einsatzbereiche verschiedener Simulationsarten

### 2.3.2 Modellerstellung für ereignisdiskrete Materialflusssimulationen

Um Abläufe in einem realen Produktionswerk virtuell abzubilden, ist eine Reduktion auf die zur Erreichung des vorgegebenen Simulationsziels erforderlichen Materialflussbestandteile und deren Eigenschaften vorzunehmen (s. Bild 21). Hierzu sind zunächst auf Basis einer Prozessaufnahme und Datenakquise alle logischen Zusammenhänge zu formalisieren (Konzeptmodell). Mit diesem Input kann mithilfe von Simulationsprogrammen ein ausführbares Computermodell erstellt werden, das in Abhängigkeit eingestellter Parameter an Entscheidungsknoten errechnet, welche Ablauf- oder Zustandsalternative gewählt wird. Bei jeder dieser Berechnungen entstehen Simulationsdaten, aus denen Rückschlüsse auf das Verhalten des Systems gezogen werden können. Durch Variation von Einstellungsparametern ergeben sich Szenarien, deren Simulationsergebnisse gegenübergestellt und interpretiert werden, um wirkungsgeprüfte Maßnahmen zur Verbesserung des Realsystems einleiten zu können und so das Simulationsziel zu erreichen.

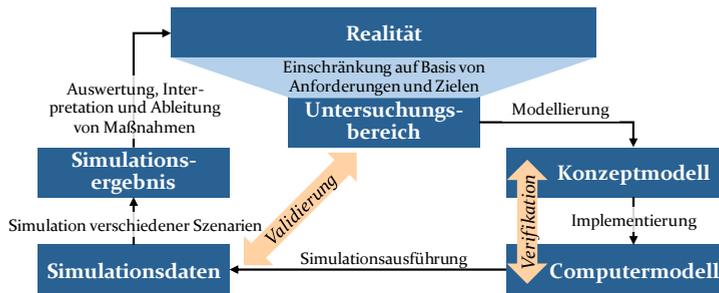


Bild 21: Vorgehensweise zur Durchführung von Simulationsstudien i. A. a. [134, 146]

Für die Modellierung liegen in Simulationsprogrammen Standardbausteine für unter anderem Prozessabläufe, Steuerungsroutinen, Materialflussobjekte, Schnittstellen, Auswertung oder Visualisierung vor. Durch geeignete Verknüpfung können die Fabrikabläufe im Untersuchungsbereich so grundlegend grafisch modelliert werden. Über integrierte Programmierschnittstellen kann darüber hinausgehendes, spezifisches Verhalten des Systems mittels Programmcode implementiert werden.

Um diesen Individualisierungsaufwand zu umgehen, werden, wie Bild 22 zeigt, für einzelne Branchen oder Betriebe mit identischen Fertigungsstrukturen zugeschnittene Bausteinbibliotheken entwickelt (z. B. [147, 148]). Sie sehen vor, die Modellierung des gesamten Untersuchungsbereichs ohne Anpassungen im Programmcode realisieren zu können. Hierzu

## 2 Identifikation von Handlungsbedarfen in der betriebsbegleitenden simulationsgestützten Optimierung

werden durch Kombination und Spezifizierung vorliegender Standardbausteine neue Bausteine erstellt, die das für den Einsatz erforderliche Verhalten aufweisen. Zur weiteren Vereinfachung der Modellgenerierung existieren Forschungsansätze (z. B. [149-151]), um Modelle automatisiert abgeleitet aus erfassten Daten zu generieren.

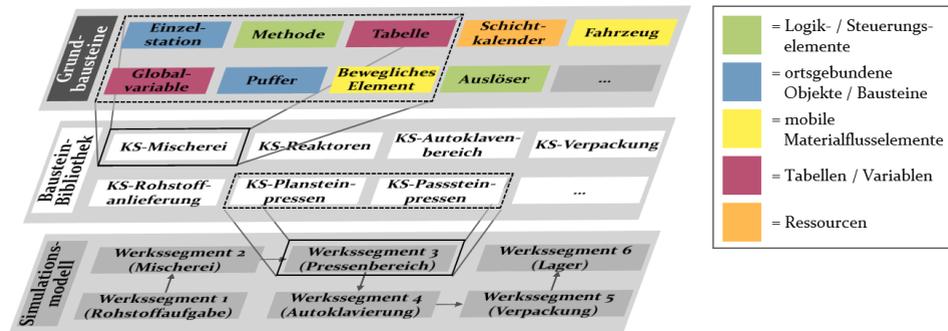


Bild 22: Aufbau und Einsatzweise der Bausteinbibliothek i. A. a. Kudlich [147]

Als Koordinationsinstrument für alle Abläufe bei der Ausführung einer ereignisdiskreten Simulation fungiert ein Ereignisverwalter. Nach der „next-event time advance“ Methode nach LAW [144] werden Berechnungen nur zu Ereigniszeitpunkten ausgeführt, welche auf einer sogenannten „Future-Event-List“ (vgl. [152]) eingetragen sind. Diese wird in chronologischer Reihenfolge abgearbeitet. Sobald ein vorangegangenes Ereignis weitere Ereignisse bedingt, werden diese einschließlich ihrer Eintrittszeitpunkte in der Liste erfasst. Diese selektive Berechnungsausführung bietet folglich große Rechenzeiterparnisse.

Von großer Bedeutung für die Qualitätssicherung bei Simulationen ist die Validierung und Verifikation des Modells (s. a. Bild 21). Damit soll über den gesamten Verlauf eines Simulationsprojekts gewährleistet sein, dass einerseits das Verhalten des Modells die Realität hinreichend genau im Hinblick auf die Zielvorgabe abbildet (*Validierung*). Andererseits muss formal sichergestellt werden, dass die Umsetzung der konzeptuellen Modellierung im Computermodell fehlerfrei erfolgt ist (*Verifikation*). Zur Durchführung der Validierung und Verifikation können verschiedene Tests eingesetzt werden, von denen sich nur manche einer der beiden Domänen eindeutig zuordnen lassen. Gängige Testmethoden sind beispielsweise Programmtestmethoden, Animation des Simulationsdurchlaufs, Tests von Teilmodellen, statistische Auswertungen oder Vergleiche mit aufgezeichneten Daten. [134, 146, 153]

### 2.3.3 Einsatzvarianten für Materialflusssimulationen

Simulationswerkzeuge sind, wie in Abschnitt 2.3.1 vorgebracht, ursprünglich für ihren Einsatz in der Planungsphase des Produktentstehungsprozesses bekannt. Insbesondere durch die Verfügbarkeit erforderlicher Schnittstellen werden sie aber zunehmend auch in der Realisierungsphase zur virtuellen Inbetriebnahme im Rahmen von Hard- und Software-in-the-loop (HiL/SiL)-Tests eingesetzt. Um meist hohe Investitionskosten durch Mehrfachnutzung zu amortisieren, empfiehlt sich auch für Materialflusssimulationen zusätzlich die Verwendung während des Anlagen-/Produktionsbetriebs. Hierbei ergeben sich vielfältige Einsatzzwecke für Herausforderungen auf kurz-, mittel- und langfristige Sicht (s. Bild 23).



Bild 23: Operative Einsatzmöglichkeiten der DES i. A. a. [134]

Bei strategischen Fragestellungen kann die Simulation beispielsweise bei der Ressourcengrobplanung oder bei geplanten Umgestaltungen des Werklayouts Hilfestellung leisten. Mittelfristig lassen sich Priorisierungen in der Materialflussteuerung oder Änderungen im Produktionsprogramm evaluieren. Dank zunehmender Vernetzung der betrieblichen Systeme findet die Simulation in den letzten Jahren verstärkt bei kurzfristigen, operativen Problemstellungen Verwendung. So eignet sie sich, um zu bewerten, wie in bestmöglicher Weise auf Störfälle oder andere Planabweichungen reagiert werden kann. Zudem ist sie in der Lage Engpässe oder andere Produktionseinschränkungen frühzeitig vorherzusehen und kann Instandhaltungsmaßnahmen vorausschauend einplanen.

Die Materialflusssimulation stellt somit ein wertvolles Unterstützungstool in der PPS (s. a. [154]) dar. Die Vorteile im Vergleich zu konventionellen PPS-Systemen liegen darin, dass Vorgänge detaillierter abgebildet werden können als in Optimierungsmodellen, wo sie aufgrund der aufwendigeren Modellierung und Gefahr hoher Rechenzeit vereinfacht erfasst sind. So erhöht die Berücksichtigung von zeitdynamischen Materialflussbeziehungen zwischen Elementen eines Produktionssystems, die wechselseitig abhängige Rüst-, Transport- und Bearbeitungszeiten einbezieht, die Genauigkeit

der Planung. Dies gilt insbesondere auch für frühe Planungsphasen, wobei beispielsweise in der Kapazitätsabstimmung der Einsatz des Rüstpersonals detaillierter vorbereitet werden kann. Zudem erhöht sich die Robustheit der Planung durch mehrmalige Simulation unter Variation von in der Realität stochastisch schwankenden Parametern (z. B. Liefer-, Rüstzeiten, thermodynamische Einflussfaktoren). Ebenso vereinfacht die Simulation durch die genaue Visualisierung von Auswirkungen einzelner Planungsänderungen die Entscheidungsfindung des Planers und erhöht so dessen Akzeptanz für das System. [51, 56, 73, 75, 155, 156]

Trotz aller Vorteile und ihrer langen Existenz am Markt hat sich die Materialflusssimulation im operativen Einsatz noch nicht durchgängig etabliert. Als Gründe werden oft der hohe zeitliche, finanzielle und personelle Aufwand sowie das damit verbundene Risiko aufgeführt [133, 157]. Dennoch erlebt sie seit einigen Jahren eine Renaissance. Dies resultiert einerseits aus einer Vereinfachung der Anwendung (insb. Modellierung) durch nutzerfreundlichere Simulationswerkzeuge, leistungsfähigere Hardware und verbesserte Datenstrukturierung und -verfügbarkeit [134, 158]. Andererseits erfordern eine steigende Komplexität und zunehmende Flexibilitätsanforderungen in Produktionssystemen den Einsatz von Simulation, um beispielsweise das Verhalten autonomer Systeme bei der Steuerung von Fertigungssystemen berücksichtigen zu können, beziehungsweise dieses proaktiv anzupassen [62, 158].

### 2.3.4 Betriebsbegleitende Simulation

Werden Materialflusssimulationen für längerfristige Planungshorizonte eingesetzt, so lässt man sie vorab für gewisse Zeit (z. B. einige Tage simulierte Zeit) laufen, um das anfangs ohne mobile Materialflussobjekte vorliegende Fabrikmodell auf einen realitätsnahen Zustand einschließlich Work in Process (WIP) u. a. einschwingen zu lassen. Um die Simulation aber operativ einzusetzen, muss das Modell in der Lage sein, jederzeit den aktuellen Zustand des Produktionssystems zu repräsentieren und auf dieser Basis Simulationsläufe zu starten. Hierfür verwendet die Wissenschaft den Begriff *betriebsbegleitende Simulation*<sup>5</sup>. Sie ermöglicht es, Prozesse

---

<sup>5</sup> Von weiteren in der Literatur synonym verwendeten Begriffen wird hier Abstand genommen, da die „parallele Simulation“ vorrangig als Verteilung auf Rechnerkapazitäten für Simulationsberechnungen, „Betreiber-Simulation“ als eine Anlagensimulation mit zusätzlicher Möglichkeit des Offline-Einsatzes und „HiL-Simulationen“ als Online-Simulation während der Inbetriebnahme angesehen werden. „Online-Simulation“ wird als Überbegriff verwendet, wenn zukünftiges Verhalten auf Basis des aktuellen Zustands vorhergesagt wird.

ohne Verzögerung an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen, kritische Situationen frühzeitig zu erkennen und mit fundiert getesteten und bewerteten Alternativstrategien zu reagieren. So lassen sich gewagtere Betriebsstrategien unter eingeschränktem Risiko verfolgen. [159-161]

Für Materialflusssimulationen sind dabei neben Anlagenzuständen und Steuerungsroutinen insbesondere die Aktualität des Modells in Bezug auf die Örtlichkeit und Zustände des WIP, die Status von Fertigungsaufträgen und personellen Ressourcen entscheidend. Diese erforderlichen Daten und Informationen (s. Bild 24 rechts) halten verschiedene Systeme der Automatisierungspyramide bereit, wobei der Datentransfer konventionell über die beiden oberen Ebenen geschieht. Durch die Auflösung der Automatisierungspyramide im Kontext der Industrie 4.0 und die damit verbundene vertikale Integration auf Basis dezentraler Datenhaltung wird dieser Transfer zunehmend auf direktem Weg aus allen dargestellten Ebenen erfolgen (s. a. Abschnitt 2.4).

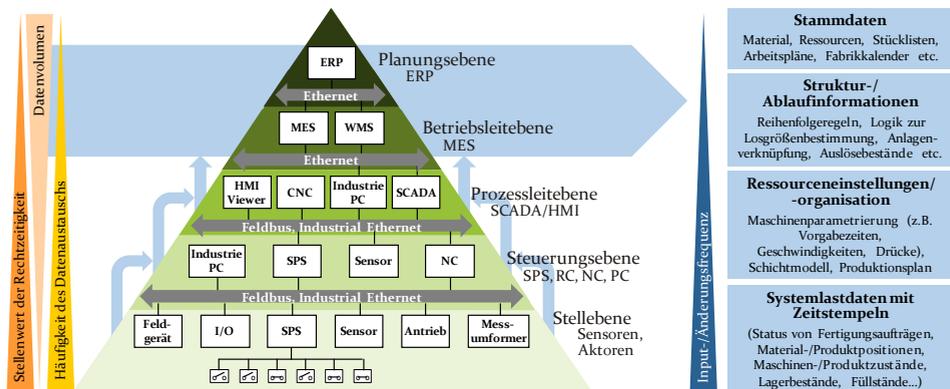


Bild 24: Bereitstellung erforderlicher Daten für betriebsbegleitende Materialflusssimulationen über konventionelle Automatisierungssysteme i. A. a. [149, 162, 163]

Selbst bei hoher Datenvielfalt, -dichte und -güte sind nicht alle für das Simulationsmodell erforderlichen Werte unmittelbar aus der Datenbasis übertragbar. Dies ist nach KAPP [161] einerseits auf zeitdiskrete Meldungen aus der Betriebs- und Maschinendatenerfassung (BDE/MDE) zurückzuführen, die nur zu relevanten Ereignissen generiert werden, und andererseits durch manuelle Erfassungen bedingt, die verspätet, unvollständig oder fehlerhaft sein können. Er zeigt angelehnt an HOTZ [164] vier Strategien auf, wie BDE-/MDE-Meldungen dennoch herangezogen werden können, um Simulationsmodelle zu initialisieren:

**1. Dynamisches Einschleusen zum Eintrittstermin am Eintrittspunkt:**

Für bewegliche Elemente (BE) wird die Simulation zu einem früheren Zeitpunkt gestartet, um deren Verhalten ab dem Zeitpunkt ihres erstmaligen Auftretens im simulierten System im Voraus zu simulieren. So kann deren Status zum Startzeitpunkt des durchzuführenden Simulationsexperiments ermittelt werden (dynamische Initialisierung). Ortsfeste Objekte werden statisch initialisiert.

**2. Dynamisches Einschleusen beim Meldetermin am letzten Messpunkt:**

Identisch zu 1. mit dem Unterschied, dass anstelle des Zeitpunkts des ersten Auftretens eines BEs ab dessen letztem Meldezeitpunkt vorab simuliert wird.

**3. Statische Initialisierung mit Korrekturalgorithmus:**

Initialisierung auf Basis von BDE-/MDE-Meldungen. Fehlende Daten und Informationen werden aus vorhandenen Daten errechnet oder geschätzt.

**4. Dynamische Synchronisation eines Vatermodells:**

Eigenständiges Simulationsmodell (= Vatermodell) läuft kontinuierlich synchron mit dem Realsystem mit und wird entsprechend der BDE-/MDE-Meldungen korrigiert. Bei Start eines Simulationsexperiments werden alle erforderlichen Daten aus dem Vatermodell in eine neue Instanz des Simulationsmodells übertragen.

Durch die betriebsbegleitende Simulation erhalten Simulationswerkzeuge nach der Planungs- und Inbetriebnahmephase Zugang zur Entscheidungsunterstützung im operativen Betrieb und finden so über nahezu den gesamten Lebenszyklus eines Produkts Anwendung. So lässt sich ein Simulationsmodell auch als prädiktiver digitaler Zwilling für den Materialfluss in einem Produktionswerk einsetzen (vgl. Abschnitt 2.4.2), um in einem digitalen Abbild vorab Auswirkungen von Maßnahmen zu testen. Da eine Simulation grundsätzlich nur vorgegebene Szenarien berechnet, muss der Nutzer vor dem Start entsprechende Inputs und Parametereinstellungen vornehmen, was einen hohen Zeitverlust zur Folge hat [133]. Daher empfiehlt sich für die betriebsbegleitende Simulation, um deren Zeitvorteil nicht einzubüßen, eine Verknüpfung mit Optimierungsmodulen, die diesen Prozess der Szenariengenerierung, -initialisierung, -variierung und -bewertung automatisieren (vgl. simulationsgestützte Optimierung, Abschnitt 2.2.5).

### 2.3.5 Ansätze zum Einbezug von Energieverbräuchen in Materialflusssimulationen

Zur Erstellung von DES-Modellen sind gemeinhin Daten und Informationen zu Zeiten, Mengen, Abfolgen, Zuständen u. a. von Maschinen, Materialien und weiteren Produktionsressourcen erforderlich. Als übergeordnete Ziele werden dabei vornehmlich Erkenntnisse hinsichtlich des Materialflussverhaltens (z. B. Engpässe, Outputs, Kapazitätsnutzung) angesetzt. Getrieben durch zunehmende Nachhaltigkeitsbestrebungen [165] und verstärkt aufgrund der Energiewende in Deutschland stehen jedoch vermehrt energetische Einflussfaktoren in Simulationsmodellen im Untersuchungsfokus. Dies dient oftmals lediglich dem Ziel, das energetische Verhalten des Systems als zusätzliches Simulationsergebnis zu erhalten, um daraus im Nachgang Ansätze für energetische Optimierungen abzuleiten (s. Bild 25 oben) [166-170]. Zu diesem Zweck ist in vielen Fällen der Einsatz von Lastmittelwerten für Produktionsmittel ausreichend [72, 171-173].

Teils werden aber Produktionsabläufe auch in Abhängigkeit energetischer Einflussfaktoren, die dynamischen Wechselwirkungen ausgesetzt sind, gesteuert (z. B. Mehrfachverwendung von Prozesswärme, temperaturabhängige Prozesszeiten). Bei einer solchen bidirektionalen Verknüpfung (Bild 25 unten) der Produktions- und Versorgungsprozesse, die wissenschaftlich weniger fundiert untersucht ist [174], sind Energieflüsse bei der Modellierung in einem hohen Detailgrad einzubeziehen.

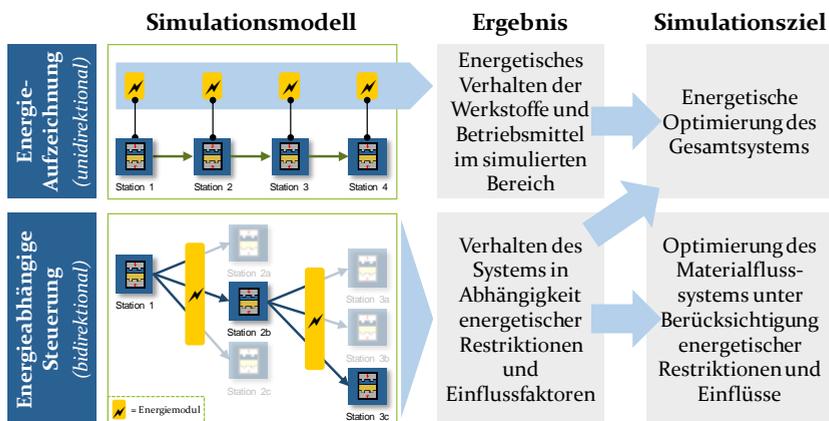


Bild 25: Varianten zur Einbindung des energetischen Verhaltens von Produktionssystemen in ereignisdiskrete Materialflusssimulationen

Energieflusssimulationen mit Bezug auf Produktionssysteme werden meist durch zusätzliche, individuelle Implementierungen innerhalb bestehender

Materialflusssimulationstools umgesetzt [175], da ein enger Zusammenhang zwischen Materialflussverhalten und Energiebedarfen besteht [176-178]. Für den Einbezug *elektrischer* Energie existieren gröbere Ansätze mittels Leistungsaufnahme-Mittelwerten über einen gewissen Zeitraum [167, 179], detailliertere mittels zustandsabhängigen, polynomial approximierten Leistungsaufnahme-Verläufen [166, 180, 181] bis hin zu sehr detaillierten Methoden, die aufgezeichnete Lastverläufe zustandsabhängig exakt verfolgen [72]. Als kritischer Punkt stellt sich hierbei der häufig produktabhängige Energiebedarf von Maschinen heraus. Diese Abhängigkeit bleibt entweder unberücksichtigt oder ist mit hohem Erfassungsaufwand verbunden.

Aufgrund der hohen Zahl an Einflüssen auf thermodynamische Systeme und aufgrund nicht eindeutiger Systemgrenzen in der Realität [182] stellt sich eine exakte Messung *thermischer* Energieflüsse im Vergleich zu elektrischem Strom als herausfordernder dar. Gleiches gilt für deren Integration mit hohem Detailgrad in ein Simulationsmodell. So gibt es abgesehen von ungenaueren Ansätzen beispielsweise mit Verbrauchsmittelwerten [183, 184] forschungsseitig exaktere Implementierungen in Simulationswerkzeugen, welche auf einer physikalischen Modellierung teils auch mit Differentialgleichungen beruhen [180, 185, 186]. Jedoch übersteigt hierbei aufgrund der gegebenen Komplexität und der individuell vorzunehmenden Implementierung der Aufwand für eine hinreichend detaillierte Modellierung oftmals den zu erwartenden Nutzen [174].

Einige Forschungsansätze greifen daher auf hybride Simulationen zurück, die ereignisdiskrete Materialflusssimulationen mit spezifischen Simulationswerkzeugen zur Abbildung kontinuierlicher Zustandsänderungen (z. B. Computational Fluid Dynamics (CFD), multiphysikalische Simulation) koppeln [176, 177, 187]. Die Interaktion zwischen den parallellaufenden Modellen ist hierbei bidirektional eingerichtet, sodass Ereignisse oder Zustände in einem Modell Aktionen im jeweils anderen auslösen. Auch in diesem Fall gilt es zu prüfen, ob die dedizierte Modellierung des kontinuierlichen Systemverhaltens die erforderliche Genauigkeit erzielt, sodass der Mehrwert den zusätzlichen Aufwand rechtfertigt.

Neuere Ansätze bedienen sich protokollierter Sensordaten mit Energiebezug (z. B. Drücke, Temperaturen, Durchflussmengen, Betriebszustände), die ohnehin im Betriebsablauf aufgenommen werden. Datengetriebene maschinelle Lernverfahren analysieren diese Daten und abstrahieren daraus das Systemverhalten, um auf Basis der erfassten Verhaltensmuster energetischer Einflussfaktoren zugeschnittene Energieflüsse für ähnliche Systemverhalten zu errechnen, die in die Simulation einfließen (vgl. [188-

192]). Bei einem solchen Black-Box-Ansatz entfällt die manuelle Modellierung und die Genauigkeit der Berechnungsmethodik nimmt durch die stetige Erweiterung der Datenbasis aus der BDE/MDE kontinuierlich zu. Es ist lediglich darauf zu achten, eine größtmögliche Menge an relevanten Einflussfaktoren in die Datenbasis zu integrieren, um die Güte des Berechnungsmodells zu maximieren.

## 2.4 Unternehmensweite Datenintegration

Für den flexiblen und reaktiven Einsatz der Simulation zur Optimierung bei kurzfristigen Problemstellungen ist eine informationstechnische Verknüpfung zu den ausführenden Systemen in der Fertigung herzustellen (s. Abschnitt 2.3.4). Die dazu erforderliche Datenverfügbarkeit nimmt im Zuge der Digitalisierung durch die Bestrebungen der Unternehmen nach einem immer höheren Vernetzungsgrad der Produktion kontinuierlich zu. Nicht nur die Verfügbarkeit, sondern auch der einfache und direkte Zugriff auf erforderliche Daten stellt einen wesentlichen Befähiger für den kurzfristigen Einsatz von Simulationswerkzeugen dar.

Standards (s. hierzu Abschnitt 2.4.3) vereinheitlichen und erleichtern die Datenerfassung, -bereitstellung sowie die -integration und erschaffen so einen digitalen Schatten der realen Produktion. Verknüpft man diesen mit einem Simulationsmodell, so liegt ein produktionssynchroner digitaler Zwilling des betrachteten Systems vor, der in der Lage ist, den Fortlauf der Produktion in einem betriebsparallelen, digitalen Testfeld zu untersuchen und Anpassungen vorab zu bewerten. Zudem bietet der digitale Schatten weitreichende Möglichkeiten, Maschinenzustände durch Datenanalysen vorausschauend zu untersuchen und durch Störfälle bedingte Planungsabweichungen zu umgehen.

### 2.4.1 Wandel der Automatisierung im Kontext von Industrie 4.0

Die Forderung nach zunehmender Produktivität, Qualität, Verfügbarkeit und Individualität erfordert Produktionssysteme, die sich flexibel an äußere und innere Einflüsse anpassen. Unter dem Schlagwort „Industrie 4.0 (I4.0)“ (s. hierzu auch [1, 3, 4, 193-196]) werden Maßnahmen und Entwicklungen zusammengefasst, die zur Erfüllung dieser Anforderungen im Bereich des Engineerings, der Produktion und des Supply Chain Managements beitragen sollen. Insbesondere die zunehmende Volatilität der Märkte führt zu steigender Produktvarianz bei immer kürzeren Produktlebenszyklen und rückläufigen Auftragsmengen, was durch die gegenwärtig

starrten Automatisierungskonzepte nicht zu bewältigen ist [194]. Hierzu ist eine hohe Anpassungsfähigkeit der Anlagen und Systeme basierend auf umfangreichen und aktuellen Daten und Informationen und deren direkte Kommunikation erforderlich.

Klassische Automatisierungslösungen folgen jedoch dem Konzept der Automatisierungspyramide (s. Bild 26). Relevante Daten und Informationen zur Fertigung entstehen in der Feldebene oft als analoge Signale, die in speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), Sensoren oder anderen Feldgeräten umgewandelt werden und über die Steuerungs- an die Prozessleitebene weitergegeben werden. Teils werden sie auch erst über Benutzereingaben (z. B. an Terminals, HMI-Boards, Smart Devices) generiert. Übergeordnete Steuerungen, Rechner oder Benutzerschnittstellen geben sie weiter an Leitrechner in der Betriebsleitebene, wie beispielsweise MES oder Warehouse-Management-Systeme (WMS). Diese leiten die Fertigungsdaten und -informationen letztlich an die Führungs- oder Planungsebene weiter, wo Maßnahmen abgeleitet und die Planung und Steuerung durchgeführt werden. [197, 198] Proprietäre Schnittstellen zwischen Systemkomponenten, starre Netzwerktopologien, Informationsverluste durch Datenaggregation und fehlende Semantik in Informationsmodellen tragen hierbei wesentlich zur Einschränkung der Flexibilität der Anlagen und der Anpassungsfähigkeit von Produktionssystemen bei.

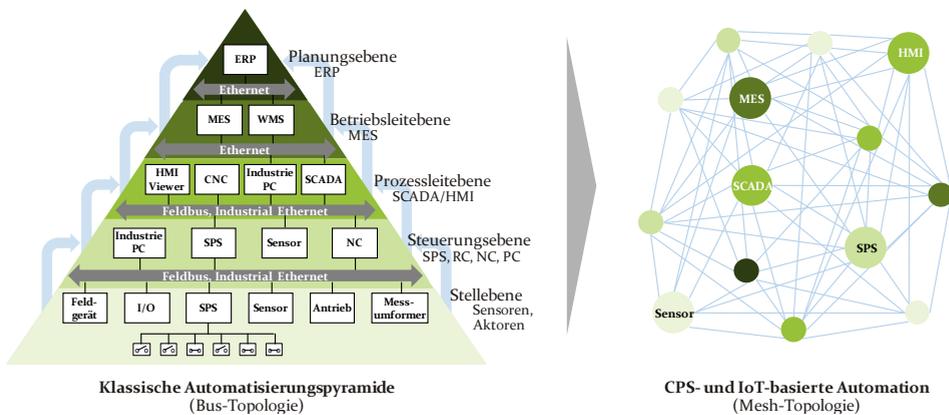


Bild 26: Auflösung der Automatisierungspyramide i. A. a. [199]

Einen Ansatz zur Beschleunigung erforderlicher Anpassungen stellt die *Digitale Fabrik* dar. Sie repräsentiert ein Netzwerk aus digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen, die über ein durchgängiges Datenmanagement integriert sind und die dazu dienen sollen, alle Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik abgestimmt auf das Produkt ganzheitlich

zu planen, zu evaluieren und fortwährend zu verbessern [200]. Dennoch wird hier weiter auf eine zentrale Datenhaltung in Produktdaten- bzw. Produktlebenszyklusmanagementsystemen (PDM/PLM) zurückgegriffen, nicht auf offene, interoperable Kommunikationsstrukturen gesetzt und keine anpassungsfähige Hardware vorausgesetzt.

Während also der Fokus der Digitalen Fabrik auf der virtuellen Abbildung der realen Fabrik liegt, setzt I4.0 durch verstärkte Vernetzung auf Integration und Verschmelzung dieser beiden Welten [201]. Elementare Komponenten dieses Ansatzes sind Cyber-Physische Systeme (CPS) und das Internet der Dinge und Dienste (Internet of Things and Services – IoTS). CPS sind Objekte, die mithilfe eingebetteter Rechner ihre Umwelt über Sensoren erfassen, über weltweit verfügbare Daten und Dienste auswerten und interpretieren und über Aktoren bedarfsgerecht auf die Umwelt einwirken [3, 194, 202, 203]. So können sie beispielsweise bei Bedarf erforderliche Daten erfassen und bereitstellen. Diese sich selbst steuernden und optimierenden Systeme sind auch in der Lage sich autonom über das IoTS untereinander und mit beliebigen Dienstleistern zu vernetzen. Dieses IoTS stellt die Gesamtheit aller digitalen und (cyber-)physischen Objekte oder Systeme dar, die untereinander vernetzt sind und hierbei auch den Menschen mit einbeziehen [204]. Dieser kann über Mensch-Maschine-Schnittstellen (HMI), worunter neben gängigen Computern beispielsweise auch Sprachsteuerung, Touch Display oder Smart Glasses fallen, auf das System einwirken.

Durch diese über das IoTS vernetzten CPS soll eine hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit in Fabriken realisierbar sein. Ein selbstoptimierendes Produktionsumfeld bezeichnet man mit dem Begriff *Smart Factory* [3, 205, 206], welche hinsichtlich der Vernetzung als wesentliche Eigenschaften offene Standards für interoperable Kommunikation, dezentrale Datenhaltung und semantische Informationsmodellierung unter sich vereint [204, 206, 207]. So ist es beispielsweise möglich, erforderliche Daten gezielt zu erfassen, ad-hoc zielgerichtet zu verarbeiten und sicher darauf zuzugreifen, ohne überflüssige Datensammlungen zu verwalten und gesonderte Schnittstellen zu generieren.

Besondere Herausforderungen für die Realisierung von I4.0 stellen gemäß KAGERMANN ET AL. [3] die folgenden Handlungsfelder dar, woraus vorwiegend die ersten drei Punkte in der vorliegenden Arbeit adressiert werden:

- Standardisierung und offene Standards für eine Referenzarchitektur
- Beherrschung komplexer Systeme
- Ressourceneffizienz

## 2 Identifikation von Handlungsbedarfen in der betriebsbegleitenden simulationsgestützten Optimierung

- Flächendeckende Breitbandinfrastruktur für die Industrie
- Sicherheit als erfolgskritischer Faktor für I4.0
- Arbeitsorganisation und Arbeitsgestaltung im digitalen Industriezeitalter
- Aus- und Weiterbildung für I4.0
- Rechtliche Rahmenbedingungen

### 2.4.2 Standards und Hürden der Betriebs- und Maschinendatenerfassung

Voraussetzung für die Entwicklung und den Betrieb einer Smart Factory ist eine hohe Datenverfügbarkeit, -aktualität und -verlässlichkeit. Schon in der konventionellen PPS stellen fehlende, falsche oder verzögert bereitgestellte Daten einen limitierenden Faktor für die Planungsgüte dar [5]. Umso gravierender ist dies, wenn die Planung und Steuerung weitgehend automatisiert erfolgen sollen. Daher besteht ein bedeutendes Handlungsfeld im Rahmen von I4.0 darin, alle Prozesse in der Produktion und in angrenzenden Bereichen „hinreichend genau“ abzubilden, um eine „echtzeitfähige Auswertebasis aller relevanten Daten zu schaffen“, was mit dem Begriff *Digitaler Schatten* bezeichnet wird [1]. Über Datenauswertungen (*Data Analytics*) kann anschließend das reale Produktionsgeschehen in mehreren Stufen in einer virtuellen Umgebung nachvollzogen, bewertet, vorhergesagt und proaktiv gestaltet werden (s. Bild 27).

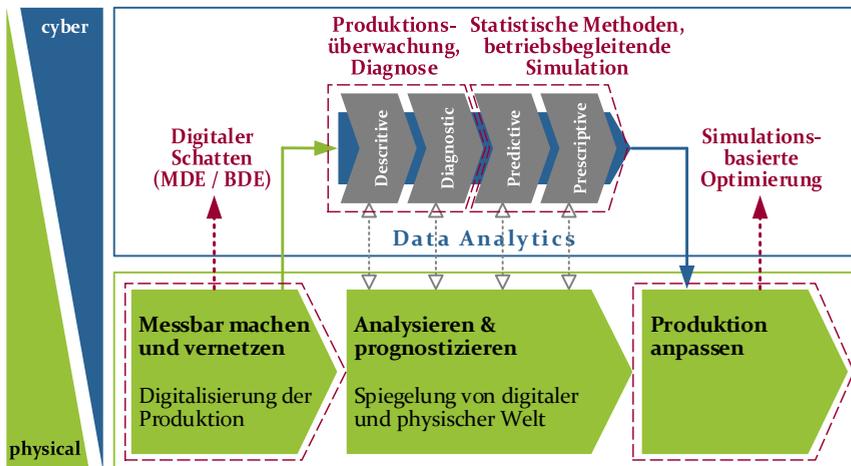


Bild 27: Verwendung des digitalen Schattens gemäß den Umsetzungsempfehlungen der Industrie 4.0 i. A. a. [1, P6]

Zu diesem Zweck kann der digitale Schatten eines jeden technischen Objekts in der Produktion (z. B. Werkzeugmaschine, Roboter, Transportmittel) auch mit dessen Engineering Modellen (z. B. Strukturmodelle, Funktionsmodelle, Simulationsmodelle) in Verbindung gebracht werden. So ist er als *Digitaler Zwilling* ein Hilfsmittel zur virtuellen Generierung und Überprüfung von Optimierungsmaßnahmen (vgl. Bild 28). Die Besonderheit liegt im Vergleich zur Digitalen Fabrik darin, dass das Engineering Modell durch die Integration des digitalen Schattens zu jedem Zeitpunkt den gegenwärtigen Zustand seines Pendant in der Realität aufweist (= synchronisierter digitaler Zwilling). Entsprechend können Simulationen eingesetzt werden, um Auswirkungen von Ereignissen im Betrieb unmittelbar nach deren Eintreten abzusehen und zielgerichtet darauf zu reagieren. Diese Untersuchungen sind nicht nur auf Produkt- oder Anlagenebene realisierbar, sondern können durch Integration mehrerer Engineering Modelle in einem digitalen Zwilling auch übergreifend für das Produktionssystem erfolgen. [1, 193, 208, 209, P6]

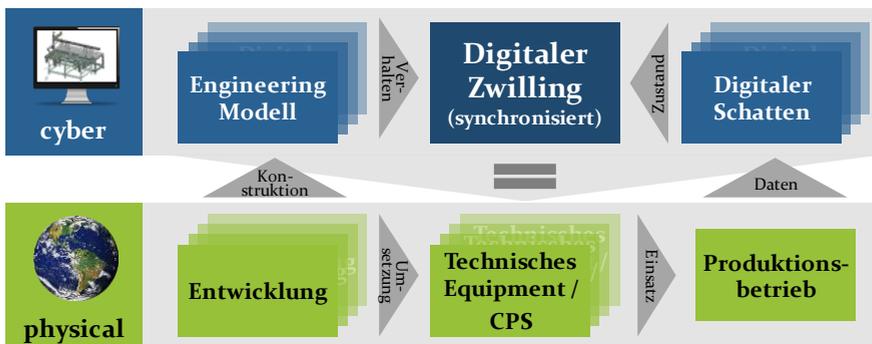


Bild 28: Generierung eines digitalen Zwillings nach [208, 210]

Eine wesentliche Problematik der BDE/MDE stellt in vielen Fällen die Festlegung der zu erfassenden Daten sowie deren Granularität [211] und Erfassungsfrequenz [212] dar. Einen Anhaltspunkt, besonders für Daten zur betriebsbegleitenden Simulation, bietet die VDI-Norm 5600, die in Blatt 3 [213] alle erforderlichen Daten für MES in verschiedenen Hierarchieebenen strukturiert aufführt. Sie orientiert sich am sogenannten PPR-Modell, das Fertigungsinformationen dem Produkt (z. B. Material/Bauteil, Auftrag, Lager), dem Produktionsprozess oder den Ressourcen (z. B. Maschine/Anlage, Werkzeug, Personal) zuordnet (vgl. [210, 214, 215]). Ebenso kann das VDMA-Einheitsblatt 66412-3 [216] herangezogen werden. Zusätzlich bietet das VDMA-Einheitsblatt 66412-1 [217], das die Generierung von Kennzahlen aus MES standardisiert, eine Grundlage zur Bewertung des Produktionsgeschehens ebenso wie zur Auswertung von Simulationsexperimenten. Die

Festlegung der erforderlichen Granularität und Erfassungsfrequenz obliegt vorab weiter Prozessexperten, die das nötige Kontextwissen haben [218]. Hier setzen aber vermehrt Forschungsarbeiten an, um eine vollständige Erfassung erforderlicher Daten anhand domänenspezifischer Informationsmodelle automatisiert zu ermöglichen [1].

Da nicht alle Daten in der Form erfasst werden können, in der sie weiterverarbeitet werden sollen, sind Zwischenverarbeitungsschritte beziehungsweise Vorabauswertungen nötig. Hierfür bieten sich Verfahren des Knowledge Discovery in Databases (KDD) (vgl. [219, 220]), angefangen bei empirischen Prozessmodellen [221], über Clusteranalysen [222] bis hin zu allgemeinem Data Mining [223-225] an. Sie ermöglichen es, implizite Zusammenhänge in den Daten zu identifizieren. In der Anwendung von Simulationen kommen auch Methoden wie das dynamische Einschleusen respektive die dynamische Synchronisation mit einem Vatermodell zum Tragen (s. Abschnitt 2.3.4).

### 2.4.3 OPC UA als Kommunikationsstandard in der Produktion

Unterschiedliche Kommunikationsstandards, fehlende oder uneinheitliche Semantik und ein folglich hoher manueller Aufwand erschweren die Vernetzung in Automatisierungssystemen sowie die Daten- und Informationsbereitstellung auf höheren Unternehmensebenen (vgl. Bild 24). Um dem zu begegnen, sind geeignete Kommunikationsprotokolle einzusetzen, die eine einheitliche semantische Datenmodellierung, eine interoperable, serviceorientierte Architektur (SOA) und eine hohe Kompatibilität zwischen verschiedenen Automatisierungskomponenten aufweisen.

Die zunehmende Automatisierung sowie die neuen Anforderungen des IoTS brachten eine Vielzahl industrieller Kommunikationsprotokolle (z. B. MQTT [226], MTConnect [227], DDS [228], CAN [229], CoAP [230, 231]) hervor, die verschiedene Anwendungsziele adressieren und so Standards für einzelne Domänen darstellen [232]. Als Standard für I4.0-Anwendungen kristallisierte sich zuletzt *OPC UA* (Open Platform Communications Unified Architecture) heraus, indem es beispielsweise im Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) [233] und im VDMA-Leitfaden für KMU [207] verankert ist oder vom IEC Standardisierungsausschuss TC65 als maßgebliche I4.0-Kommunikationstechnologie angesehen wird [234]. Aus diesem Grund soll der Fokus in der vorliegenden Arbeit hierauf gerichtet sein.

OPC UA ist ein plattformunabhängiges, Server-Client- und Publish/Subscribe-befähigtes Kommunikationsprotokoll, das Charakteristika einer SOA sowie die Möglichkeit der semantischen Datenbeschreibung aufweist. Neben der Schnittstellenfunktion bietet es folglich auch spezifizierte Dienste, die der Anwender nutzen und ausbauen kann. Sie ermöglichen beispielsweise die Erstellung von anwenderspezifischen Verbindungen zwischen Applikationen (Session Service Set), das Suchen und Filtern von Informationen (View Service Set) oder das Speichern von historischen Daten (Historical Data Access). [235, 236]

Für die automatische Anbindung an einen beliebigen Client sind insbesondere die spezifischen Informationsmodelle [237] der OPC-UA-Spezifikation verantwortlich, die auf einem generischen Adressraummodell [238] aufbauen. Die Modellierung in OPC UA basiert auf sogenannten Knoten (Nodes) und Beziehungen (References). Ein Node ist mit einem Objekt in einer objektorientierten Programmiersprache vergleichbar. Er kann Objekte, Variablen und Methoden repräsentieren. Eine Reference stellt die Verbindung zwischen zwei Nodes dar, die sich über ihren Namen definiert (z. B. „hasObjectType“, „hasComponent“). Neben References können Nodes schreib- und lesbare Attribute beinhalten. Hierdurch können sie mit Metainformationen (z. B. maschinenlesbare Beschreibung, Gültigkeitsbereich) angereichert werden, was zusätzlichen Dokumentationsaufwand erspart. Zudem wird in OPC UA jede Information mit einem Zeitstempel versehen, wodurch die Grundlage für Datensynchronisation geschaffen wird. Die OPC-UA-Adressraummodellierung [238] stellt unterschiedliche Node-Classes mit Standardattributen sowie Standard-ReferenceTypes, -DataTypes und -EventTypes zur Verfügung, die nach Bedarf erweitert werden können, indem sie als Instanzen Eigenschaften der definierten Objekte erben und auch überschreiben. Es kann auch als Metamodell bezeichnet werden. [235, 239, 240]

Nach der Definition aller in OPC UA möglichen Knoten im Adressraum wählt man daraus für das anwendungsspezifische Informationsmodell alle für die jeweilige Anwendung notwendigen Knoten aus. Diese sind mit zu befüllenden Datenbereichen auf einem Server vergleichbar. So erhält man ein maßgeschneidertes Informationsmodell, das alle branchenspezifischen Anforderungen berücksichtigt. Dank des Aufbaus aus Nodes und References kann jedes Objekt mit beliebig vielen Informationen verknüpft werden, wodurch bereits beim Abfragen von Daten Abhängigkeiten mit anderen Objekten identifiziert werden. Diese Übertragung der Semantik gewährleistet dem Client eine bessere Interpretierbarkeit der Informationen und ermöglicht so eine automatisierte Anbindung. [235, 240, 241]

Eine Besonderheit von OPC UA liegt darin, dass mithilfe entsprechender Dienste Daten bedarfsgerecht übertragen werden. Anstatt Datenpunkte zyklisch abzufragen, können dank der Push-Funktionalität je nach Vorgabe Daten auch nur bei Änderung oder Überschreitung eines festgelegten Werts gesendet werden (DataChangeNotification). Dies gewährleistet die Entlastung des Netzwerks. Aufgrund der Bidirektionalität von OPC UA können Daten bei vorliegenden Berechtigungen auf demselben Weg von einem Client an einen Server zurück übertragen werden. Datenaustausch kann darüber hinaus nicht nur zwischen Client und Server stattfinden, auch zwei OPC-UA-Server können interagieren. OPC-UA-Server können in beliebige Geräte, Sensoren oder Controller mit entsprechenden Rechenkapazitäten eingebettet werden, sodass Daten und Informationen dezentral an den Orten vorgehalten werden, an denen sie entstehen (Bild 29). Somit eignet sich OPC UA besonders als Kommunikationstechnologie, wenn in Unternehmen bislang wenig Vernetzung über betriebliche Informationssysteme vorherrscht. Zudem erreicht man eine vertikale Integration von der Feldebene bis zur Planungsebene (vgl. Bild 24), ohne dazwischenliegende Schichten einbeziehen zu müssen (*vertikale Integration*). [194, 235, 236, 242]

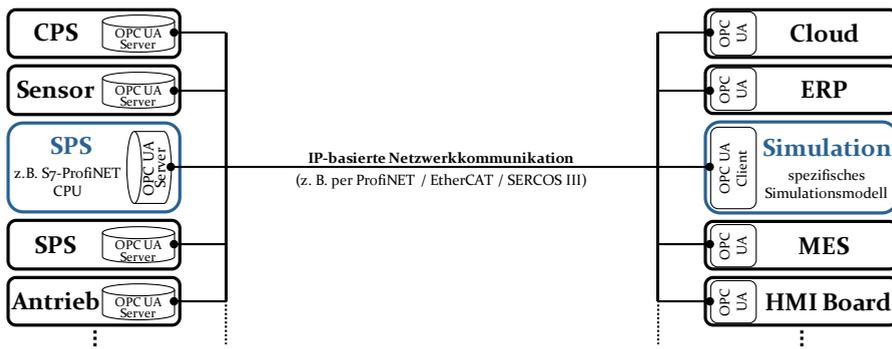


Bild 29: Beispielarchitektur zur direkten Datenbereitstellung aus der Feldebene unter Nutzung eingebetteter OPC-UA-Server in Automatisierungskomponenten

#### 2.4.4 Überwachung von Fertigungsprozessen durch Data Analytics

Neben der Nutzung erfasster Daten für betriebswirtschaftliche Zwecke (z. B. Produktionsplanung, Controlling), sind diese auch prozessnah von besonderer Relevanz. Sie können entweder betriebsynchron („online“) oder zu einem späteren Zeitpunkt („offline“) ausgewertet werden, um direkt in die Fertigungsprozesse einzugreifen [243]. So lassen sich beispielsweise anhand geeigneter Algorithmen Fehlerschwerpunkte unmittelbar

automatisiert identifizieren und daraufhin verantwortliche Personen informieren [3, 244].

Für einen effizienten Betrieb ist eine zuverlässige Instandhaltung (IH), insbesondere bei verschleiß- und fehleranfälligen Anlagen, von hoher Relevanz. Bei einer hohen Vernetzung von Anlagen und folglich deren optimierter Auslastung sind Wechselwirkungen umso komplexer und Ausfälle umso kritischer, was die Anforderungen an die Instandhaltungsplanung erhöht [245]. So ist auch die Qualität und Stabilität der Auftragsplanung in hohem Maße von einer planbaren IH abhängig. Für die IH existieren, wie Bild 30 zeigt, verschiedene

Strategien, die sich im Spannungsfeld zwischen ungenutztem Abnutzungsvorrat<sup>6</sup> (s. Bild 31) und dem Verpassen der vorsorglichen Wartungsmöglichkeit bewegen. Bei der reaktiven IH verzichtet man auf Wartung und setzt die Betrachtungseinheit erst nach Schadenseintritt wieder instand. Im Gegensatz zur vorbeugenden IH, bei der in Abhängigkeit eines festgelegten Parameters ohne Berücksichtigung des tatsächlichen Zustands der Anlage Wartungstätigkeiten durchgeführt werden, sind bei einer zustandsorientierten IH Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen erst dann vorgesehen, wenn dies der Abnutzungszustand einer Anlage erfordert [247]. Als Weiterentwicklung zielt die vorausschauende IH darauf ab, durch frühzeitige Identifikation von kritischen Zustandsveränderungen Funktionsstörungen vor ihrem erstmaligen Auftreten zu antizipieren und zu verhindern oder Folgeschäden zu minimieren [248]. Zur Fehlererkennung notwendige Parameter müssen hierbei nicht bekannt sein, denn mithilfe verschiedener statistischer Analysetechniken können erfasste Daten auf Muster und Zusammenhänge hin analysiert und bewertet werden, um bislang unbekanntes Fehlerbilder zu entdecken [249].

---

<sup>6</sup> Als Abnutzungsvorrat wird der Umfang an technischer Leistungsfähigkeit einer Einheit (Maschine, Komponente o.ä.) angesehen, der zur Erfüllung der geforderten Funktion unter festgelegten Bedingungen dient. Dieser nimmt unvermeidbar während der Nutzung oder auch ohne Beanspruchung aufgrund von Reibung, Schwingungen, chemischen Veränderungen, Überbeanspruchung, Alterung oder ähnlichen Einflüssen ab. [246]

2 Identifikation von Handlungsbedarfen in der betriebsbegleitenden simulationsgestützten Optimierung

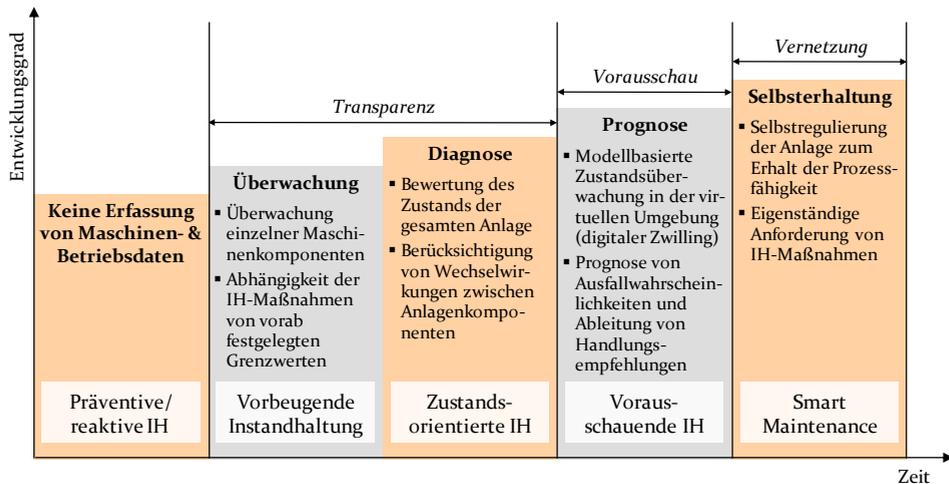


Bild 30: Evolution der Instandhaltungsstrategien i. A. a. Mühlhnickel et al. [245]

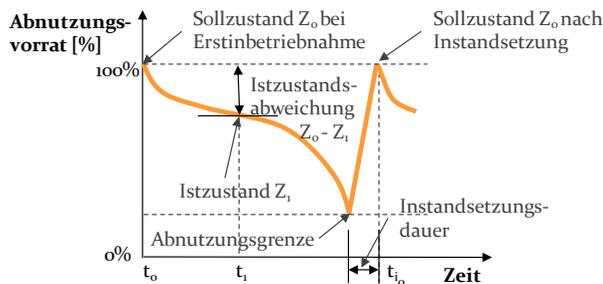


Bild 31: Modell des Abnutzungsvorrats i. A. a. [250, 251]

Zur Verfolgung einer vorausschauenden Instandhaltung sind geeignete Diagnosesysteme zur Zustandsüberwachung (engl. *Condition Monitoring*) erforderlich, deren elementarer Ablauf in Bild 32 dargestellt ist. Sie dienen dazu, aus sensorisch erfassten Werten möglichst frühzeitig physikalische Anzeichen für eine potenzielle Störung und deren voraussichtlichen Eintrittszeitpunkt herauszulesen, um ausreichend Zeit für deren Abwendung zur Verfügung zu haben und die Instandhaltung zu einem geeigneten Zeitpunkt zu starten [248]. Für die Zustandsaufnahme sind zunächst die für die Diagnose relevanten Parameter festzulegen, die mit geeigneter Sensorik erfasst werden können. Über geeignete Schnittstellen (z. B. OPC UA – s. Abschnitt 2.4.3) werden sie an ein System zur Zustandsbewertung übertragen. Dort sind die Messwerte zunächst aufzubereiten, um beispielsweise Ausreißer zu eliminieren oder ein verarbeitbares Datenformat zu erhalten und die Daten so auf die Messwertinterpretation anhand von Diagnoseverfahren vorzubereiten. [248, 252, 253]

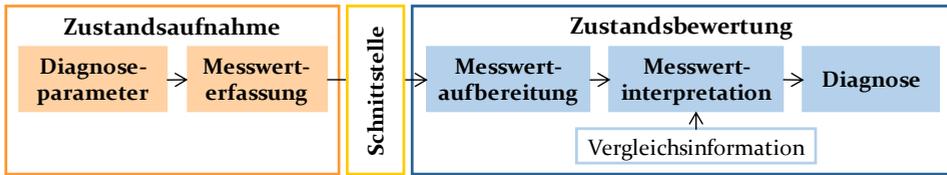


Bild 32: Elementarer Aufbau eines Diagnosesystems i. A. a. [252]

Diagnoseverfahren können daten-, modell- und wahrscheinlichkeitsbasiert sein [254]. Während datenbasierte Methoden ohne direkte Kenntnis des vorliegenden Systems Rückschlüsse aus Veränderungen in den Sensorwerten (z. B. mittels Analysemethoden des Data Minings – vgl. Abschnitt 2.4.2) ziehen, greifen wahrscheinlichkeitsbasierte Methoden auf stochastische Modelle (z. B. Zeitreihenanalysen – vgl. Abschnitt 2.2.2) zur Prognose von Störungen zurück. Modellbasierte Verfahren beruhen entweder auf einem physikalischen Modell des zugrundeliegenden Systems, mit dessen Hilfe der Systemzustand errechnet oder simuliert wird, oder auf einem empirischen Modell, das den Zustand aus Datenverlaufsmustern (z. B. Trendkurven [252]) ableitet, die zuvor auf Basis gemessener Werte erstellt wurden. [255-257]

Auf Basis der errechneten Systemzustände und Verhaltensmuster sind schließlich Schlussfolgerungen zu ziehen, um Instandhaltungsmaßnahmen einzuleiten. Hierzu können Warngrenzen von Prozessexperten festgelegt werden, an denen Werker informiert werden [252, 258]. Als automatisierte Alternative können Expertensysteme eingesetzt werden, die regelbasiert oder auf Grundlage einer diagnostischen oder selbstlernenden Wissensbasis (z. B. Fuzzy-Logik, neuronale Netze) Diagnosen erstellen und somit Instandhaltungsentscheidungen treffen (s. a. [259, 260]). Auch neuere Ansätze zur Selbstüberwachung und -optimierung von Maschinen (*Smart Maintenance*) werden hierzu verfolgt [245, 261]. Durch diese Voraussicht wird erreicht, dass die Instandhaltung hinsichtlich des erforderlichen Zeitpunkts und der Zeitdauer planbar und somit in die Produktionssteuerung integrierbar ist. Auch Simulationsverfahren werden hierbei eingesetzt, um die Auswirkungen von Störfällen zu bewerten und bedarfsgerecht einzugreifen [262].

## 2.5 Ableitung des Forschungsbedarfs unter Abgrenzung bestehender Forschungsansätze

An eine geeignete Methodik zur simulationsgestützten Optimierung der Fertigungsabläufe, die als Grundlage eines spezifischen Entscheidungsunterstützungssystems (engl. *decision support system*, DSS) für den operativen Einsatz in KS-Werken („KS-Cockpit“) dienen soll, sind mannigfaltige Anforderungen gestellt. Diese sind in Kapitel 1 im Detail erläutert. Aus dem Stand von Wissenschaft und Technik lassen sich hierzu Lösungswege ableiten, die die in Tabelle 6 aufgezeigten Forschungsbedarfe offenlegen. Aus deren Zusammenführung ergibt sich folgende Forschungsfrage, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit adressiert wird: Wie lassen sich Fertigungsaufträge in einer hybriden Produktion durch eine optimierte Planung und vorausschauendes Reagieren im Falle von Planabweichungen mithilfe einer betriebsbegleitenden Simulation ohne erforderliches Eingreifen des Bedieners ressourceneffizient steuern?

Tabelle 6: Forschungsbedarfe abgeleitet aus dem Stand von Wissenschaft und Technik

Anf.	Lösungsansatz	Forschungsbedarf	Abs.
A1	Verwendung eines bausteinbasierten Referenzmodells für die Simulation der Materialflüsse in KS-Werken	F1: Ableitung eines generischen Referenzmodells aus gegebenen Werksstrukturen und Modellierung für eine DES	3.1.2
A2/3	Modellierung von Schüttgut in verwendungsgerechten Batches (ausreichende Größe um Realität valide zu modellieren)	F2: Methodik zur laufzeiteffizienten und validen Modellierung von Schüttgut in ereignisdiskreten Simulationsmodellen	3.1.3
A4	Messung der tatsächlichen Energieverbräuche und Integration in eine DES	F3: Modellierung des Energieeinsatzes in der KS-Herstellung	3.2.1 3.2.2
A5	Energiesimulation: Integration des Härteprozesses in ein DES-Modell	F4: Modellierung des Autoklavierungsprozesses für Kalksandsteine	3.3
A15	Voraussimulation für bessere Ausgangsbasis der Optimierung	F5: Methodik zur Verwendung der Simulation als Prognoseinstrument zur Vorhersage des Produktionszustands zum Zeitpunkt des Eintretens von Optimierungsergebnissen	5.1.3
A6	Einsatz einer Materialflusssimulation	F6: Methodik zur Bewertung von alternativen Auftragsplänen zur KS-Herstellung	3.1.1 4.3.1
A14	Automatische Bewertung der Rescheduling-Vorschläge im dynamischen Kontext		5.1.4
A12	Ableitung der Absatzmengen aus Vergangenheitsdaten unter Berücksichtigung von Vertriebsinformationen	F7: Verfahren zur Ableitung von Absatzmengen aus Vergangenheitsdaten für KS-Unternehmen und Methodik zur Kopplung mit Vertriebsinformationen	4.2.1
A7	Simulationsgestützte Optimierung: Integration von Optimierungsalgorithmen im Simulationsmodell	F8: Methodik zur Kopplung von Simulation und Optimierungsverfahren für KS-Werke	4.1 4.3 4.4

Anf.	Lösungsansatz	Forschungsbedarf	Abs.
A8	Modulare Algorithmen für beliebige Spezifikationen des Simulationsmodells	<b>F9:</b> Entwicklung geeigneter Algorithmen zur Optimierung der KS-Produktionsabläufe <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ermittlung effizienter Losgrößenoptimierungsverfahren für den Pressprozess in KS-Werken</li> <li>▪ Methodik zur simulationsgestützten Bestimmung optimaler Beschickungsstrategien für einen festgelegten Planungshorizont</li> <li>▪ Methodik zur Bestimmung optimaler Mischzeitpunkte mittels Simulation</li> </ul>	4.1
A9	Algorithmische Bestimmung optimaler Losgrößen und anschließender Test im dynamischen Umfeld mittels Simulation		4.2
A10	Simulationsgestützte Optimierung der Autoklavierung von KS		4.3
A11	Bestimmung optimaler Mischzeitpunkte unter Gewährleistung der Prozesssicherheit		4.4
A13	Überwachung der Produktion und bedarfsgemäßes Rescheduling	<b>F10:</b> Methodik zur kontinuierlichen Bewertung des aktuellen Produktionszustands und bedarfsgemäße Einleitung von Gegenmaßnahmen	5.1
A16	Selbstlernendes System für Optimierungsdauer und Energieverbräuche	<b>F11:</b> Entwicklung eines selbstlernenden Systems auf Basis von kontinuierlich erfassten Ergebnisdaten	5.1.3 3.2.1
A17	Echtzeitanbindung der Produktionsdatenerfassung an die Simulation	<b>F12:</b> Methodik zur Erfassung und Übertragung erforderlicher Daten für die Simulation von KS-Werken	5.2.1
A18/19	Direkte Kopplung der speicherprogrammierbaren Steuerungen mit der Simulation per OPC UA		5.2
A21	Direkte Kopplung der speicherprogrammierbaren Steuerungen mit der Simulation per OPC UA	<b>F13:</b> Ermittlung geeigneter Schnittstellen zur Steuerung der Produktion aus der Simulation heraus	5.1.4
A20	OPC UA Informationsmodell zur semantischen Kopplung zwischen Simulation und Echtzeitdatenbasis	<b>F14:</b> Erstellung eines Informationsmodells für die Verknüpfung von KS-Anlagen mit dem Simulationsmodell für KS-Werke	5.2.3
A22	Identifizierung kritischer Einflussfaktoren auf die Produktionsabläufe	<b>F15:</b> Ableitung von Freiheitsgraden zur Optimierung der KS-Produktionsabläufe	4.1.3
A23	Verwendung der Simulation mit ihrer Visualisierungsfähigkeit und Eingriff über Parameteranpassung und Rescheduling-freigabe	<b>F16:</b> Ermittlung erforderlicher und geeigneter Eingriffspunkte für den Menschen in die simulationsgestützte Auftragsregelung	5.3.1

- Anf. ≙ Verweis auf die adressierte Anforderung aus Kapitel 1  
 Abs. ≙ Abschnitte, die Lösungen für diesen Forschungsbedarf aufzeigen  
 ≙ vornehmlich Simulationsbezug  
 ≙ vornehmlich Optimierungsbezug  
 ≙ vornehmlich Bezug zur Echtzeitdatenanbindung  
 ≙ menschliche Vorgaben/Eingriffe

## Grundlegender Aufbau der Methodik

Bild 33 visualisiert den Aufbau des KS-Cockpit aus seinen wesentlichen Bestandteilen, die zugleich die Hauptthemen der Forschungsarbeit wiedergeben. Gängige Systeme zur Entscheidungsunterstützung in der Produktion, wie z. B. PPS-Systeme, basieren häufig auf zeitlich überholten Daten oder

Produktionszuständen [5]. Demgemäß stellt der Austausch von Daten zwischen der Produktion und dem DSS in Echtzeit ein wesentliches Erfordernis dar. Da hierbei eingesetzte Optimierungsverfahren üblicherweise einen statischen Charakter aufweisen, wird – wie für die Beherrschung der Komplexität in Wertschöpfungsnetzen empfohlen [158] – im Kern auf das Hilfsmittel Simulation gesetzt. Diese ist zudem für lang-, mittel- und kurzfristige Problemstellungen einsetzbar und deckt somit ein breites Optimierungsspektrum ab. Ebenso erlaubt sie die Modellierung des energetischen Verhaltens von Anlagen (z. B. elektrische Leistungsaufnahme, thermodynamische Wechselwirkungen), sodass dessen Einflüsse auf die Produktionsabläufe berücksichtigt werden können.

Um gängigen Hinderungsgründen für einen Simulationseinsatz (vgl. [62, 133]) zuvorzukommen, wird zur Beschleunigung der Modellbildung ein baukastenbasiertes Referenzmodell hergeleitet und zur Vereinfachung der Datenanbindung ein geeignetes Informationsmodell entwickelt. Auch im Einsatz soll die Simulation aufwandsarm sein oder sogar selbstregulierend (vgl. [263]) arbeiten. Hierzu muss sie kurze Laufzeiten aufweisen, unter Integration von Algorithmen zur simulationsgestützten Optimierung befähigt werden, kontinuierlich die Einhaltung der geplanten Abläufe überwachen und Steuerungsanweisungen direkt aus der Simulation in die Produktionsanlagen übertragen. Trotz dieses eigenständigen Ausgleichs von internen und externen Störeinflüssen sind Eingriffe eines Entscheiders auf die Produktionsabläufe weiterhin möglich, wodurch einer der ausschlaggebenden Gründe für das Scheitern der CIM-Bestrebungen [2] ausgeschlossen wird.

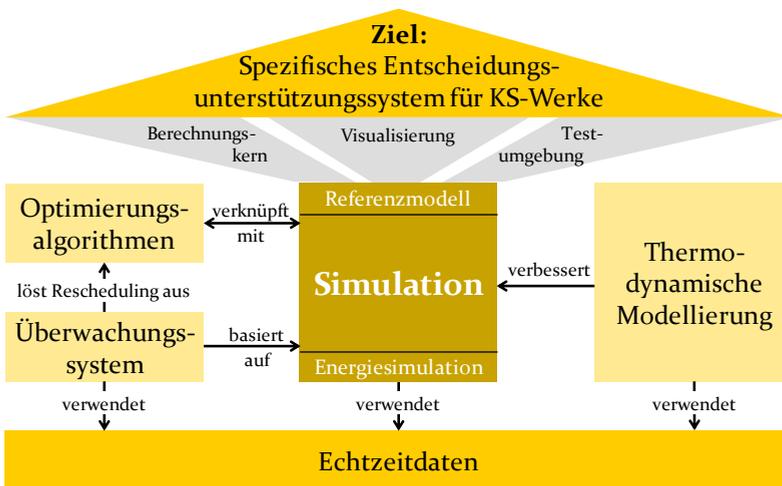


Bild 33: Hauptbestandteile der Methodik zur simulationsgestützten Auftragsregelung

### Abgrenzung von bestehenden Forschungsansätzen

Auf dem Gebiet der operativen Einsetzbarkeit von Materialflusssimulationen zur Optimierung von Produktionsabläufen wird seit vielen Jahren intensiv geforscht. Vereinfachungen in der Modellierung sowie Integration von Optimierungskompetenz in Simulationssysteme standen in der nahen Vergangenheit im Fokus der Forschung. Derzeit rücken eine zunehmende Eigenständigkeit der eingesetzten Systeme, energetische Betrachtungen sowie ein immer kurzfristigerer und zyklischer Einsatz zur Entscheidungsunterstützung in den Mittelpunkt. Demnach existieren auch Ansätze, die zumindest in Teilen Methoden zur Realisierung eines DSS ähnlich dem KS-Cockpit untersuchen. Eine Methodik, die die gesamtheitliche Struktur des KS-Cockpit abdeckt, liegt jedoch nicht vor. Dies untermauert Tabelle 7, in der Forschungsansätze abgegrenzt werden, die mindestens vier der in dieser Arbeit adressierten Forschungsbedarfe behandeln. Für die in Abschnitt 2.1.3 hergeleiteten, zur KS-Herstellung verwandten Produktionsprozesse wurde einzig im Bereich der CFK-Herstellung ein entsprechender Ansatz von Lütjen [41, 189] entwickelt. Zu den anderen Prozessen liegt keine Literatur vor.

Tabelle 7: Bewertung der Adressierung vorliegender Forschungsbedarfe in vorhandenen Publikationen [41, 75, 122, 127, 161, 189, 264-282]

	Almeder et al. [127, 264-267]	Frantzen [270]	Kapp [161]	Klemmt et al. [275-277]	Krug et al. [268, 269]	Kück et al. [122, 271-274]	Lütjen [41, 189]	Monostori et al. [75, 278-282]
F1 Bausteinbasiertes Referenzmodell	○	○	●	●	○	○	●	●
F2 Laufzeiteffiziente und valide Modellierung von Schüttgut in DES	○	○	○	○	○	○	○	○
F3 Modellierung des Energieeinsatzes in der KS-Herstellung in DES-Modellen	○	○	○	○	○	○	○	○
F4 Modellierung eines Autoklavierungsprozesses in DES-Modellen	○	○	○	◐	○	○	◐	○
F5 Voraussimulation	○	○	○	○	○	○	○	○
F6 Bewertung von alternativen Auftragsplänen	●	●	●	●	●	●	●	●

2 Identifikation von Handlungsbedarfen in der betriebsbegleitenden simulationsgestützten Optimierung

F7	Prognose von Absatzmengen aus Vergangenheitsdaten	○	○	○	○	○	●	○	○
F8	Kopplung von betriebsbegleitender Simulation und Optimierungsverfahren	●	●	○	●	●	●	○	●
F9	Entwicklung von spezifischen Algorithmen	●	●	○	●	●	●	○	●
F10	Methodik zum automatisierten Rescheduling nur bei signifikanter Abweichung vom geplanten Produktionsablauf	○	●	○	◐°	○	◐°	○	●
F11	Selbstlernendes System zur Modellpräzisierung	○	○	○	○	◐	○	○	◐
F12	Methodik zur Echtzeitübertragung simulationsrelevanter Daten	◐°	◐°	●	●	◐°	◐°	○	●
F13	Automatisierte Rückführung von Optimierungsergebnissen in Automatisierungssysteme	○	●	○	○	◐°	●	○	●
F14	OPC-UA-Informationsmodell für die Verknüpfung von Anlagen und Simulationsmodellen	○	○	◐°	◐°	○	◐°	◐°	◐°
F15	Ableitung kritischer Freiheitsgrade zur Optimierung der KS-Produktion	○	○	○	○	○	○	○	○
F16	Manuelle Eingriffe in die Auftragsregelung	●	●	●	●	●	●	●	●

- ≙ Forschungsansatz wurde in Publikationen adressiert
- ◐ ≙ Ein ähnlicher Forschungsansatz wurde in Publikationen adressiert
- ◐° ≙ Forschungsansatz wurde in Publikationen am Rande bzw. grob adressiert
- ≙ Forschungsansatz wurde in keiner Publikation adressiert

° Bewertung wird im aktuellen Abschnitt detaillierter erläutert

Alle darin vorgestellten Ansätze setzen Simulations- und Optimierungsverfahren, weitgehend sogar in interagierender Form, ein. Als frühe Anwender dieser Methodik setzt eine Forschergruppe der Universität Wien um *Almeder* den Fokus auf die Erforschung geeigneter Methoden zur Integration von DES und Optimierungsverfahren. Zu diesem Zweck wird hoher Wert auf eine schlanke und leistungsfähige Simulationsengine gelegt, um für einen operativen Einsatz akzeptable Laufzeiten zu erreichen. Eine Echtzeitanbindung an Maschinen- und Betriebsdaten ist allerdings nicht vorgesehen, sondern es werden lediglich einem ERP-System Auftragsdaten entnommen. [127, 264-267]

Zur digitalen Produktionsentwicklung für die CFK-Herstellung setzt *Lütjen* die Materialflusssimulation ein. Durch die Anwendung der Prepreg-Technik werden hierbei Autoklavierungsprozesse modelliert, jedoch in einer vereinfachten Form mit festgelegten Bearbeitungszeiten anstelle einer Berücksichtigung der thermodynamischen Zusammenhänge. Die Modeller-

stellung erfolgt weitgehend automatisiert anhand eines semantischen Fabrikdatenmodells, das in einer UML-basierten domänenspezifischen Modellierungssprache aufgebaut ist, nicht aber auf die OPC-UA-Spezifikation zurückgreift. Aufgrund der Anwendung zur Fertigungs- und Logistikplanung werden weder Optimierungsmodelle, noch Echtzeitdatenverknüpfungen oder Reschedulingmechanismen behandelt. [41, 189]

Ebenso wenig setzt *Kapp* Optimierungsverfahren ein, sondern fokussiert sich auf die Entwicklung einer Methodik zur adaptionsfähigen, betriebsbegleitenden Fabriksimulation in Erweiterung der Digitalen Fabrik. Über ein bausteinbasiertes Referenzmodell schafft er eine erhebliche Vereinfachung der Modellgenerierung. Zudem wurde ein XML-basiertes Informationsmodell der Digitalen Fabrik erweitert und in der „Data Engine“ (spezifische Datenbank) hinterlegt, um daraus eine generische Anknüpfung der Echtzeitdaten an das Simulationsmodell zu erreichen. Die automatische Modellgenerierung aus dem anpassbaren Informationsmodell der Data Engine impliziert eine gewisse Validität des Simulationsmodells, jedoch ist ein kontinuierlicher Abgleich zwischen Simulationsergebnissen und realen Abläufen nicht explizit beschrieben. Durch den Verzicht auf die Integration von Optimierungsmechanismen ist auch eine automatisierte Überwachung der Einhaltung von geplanten Produktionsabläufen und bedarfsgemäßes Rescheduling nicht vorgesehen. [161]

*Krug et al.* arbeiten wiederum an einer effizienten Verknüpfung von DES und verschiedenen Algorithmen im Praxiseinsatz. Entsprechend werden Verfahren entwickelt, die zu einer Minimierung der Laufzeit zur Lösungsfindung beitragen. Trotz der Verwendung weiterer Stamm- und Bewegungsdaten ist auch hier keine Echtzeitkopplung vorgesehen, da eine Unterstützung der Auftragsplanung im PPS-System im Vordergrund steht. [268, 269]

*Frantzén* stellt in seiner Dissertation ein simulationsbasiertes (Re-)Scheduling-Verfahren unter Einbezug von Echtzeitdaten für hybride Flow Shops als Produktionstyp, denen auch die KS-Herstellung zuzuordnen ist, vor. Diese Methodik wird in eine bestehende Plattform für simulationsbasierte Optimierung („OPTIMISE“) modular integriert. Neben der Optimierungsfunktion wird das Simulationsmodell auch für die Bewertung von potenziellen Abweichungen gegenüber geplanten Abläufen (Auslöser: Betriebszustandsänderungen, Nutzereingriffe) genutzt, um ergänzend zu periodischen Neuplanungen automatisiert Rescheduling-Läufe auszulösen. Die

Erstellung der Simulationsmodelle sowie deren Anknüpfung an Echtzeitdaten ist nicht im Detail beschrieben, erscheint anhand der Ausführungen aber proprietär für den Anwendungsfall. [270]

Im Rahmen eines 2016 begonnenen DFG-Projekts entwickeln *Kück, Freitag et al.* ein auf Echtzeitdaten basierendes, simulationsgestütztes Optimierungsverfahren, mit dem adaptiv für den aktuellen Produktionszustand optimale Priorisierungsregeln ermittelt werden. Das implementierte Simulationsmodell wird hierbei periodisch oder bei Maschinenausfällen über eine MES-Schnittstelle an den Realzustand angepasst und einzig für die Bewertung von (Zwischen-)Ergebnissen des verknüpften Algorithmus im dynamischen Kontext eingesetzt. Eine Anpassung bei weiteren Planabweichungen ist nicht vorgesehen. Die Anbindung von Echtzeitdaten ist den Veröffentlichungen nur auf konzeptueller Basis zu entnehmen. [122, 271-274]

Der Fokus der Dresdener Forschergruppe um *Horn, Klemmt und Weigert* liegt auf einer Kombination von simulations- und prioritätsregelbasierten sowie exakten Lösungsverfahren für die Optimierung von Fertigungsabläufen mit kurzfristigen Planungshorizonten in der Halbleiter- und Elektronikproduktion. Mithilfe von automatisch generierten Simulationsmodellen aus aktuellen Produktionsdaten stellen sie sicher, dass das Modell auf dem aktuellen Stand ist, ohne jedoch eine gesonderte Validierung vorzunehmen. Ähnlich zur Autoklavierung in der KS-Herstellung werden Ofenprozesse mit Chargenbearbeitung simulationsbasiert optimiert, wobei jedoch fixe anstelle thermodynamikabhängiger Bearbeitungszeiten angesetzt werden. Die reaktive Neuplanung wird bei Bedarf durch den Nutzer initiiert und basiert auf dem zuletzt in einer Datenbank abgelegten Zustand der Fertigung. [275-277]

Eine Forschergruppe der Universität Budapest um *Monostori, Pfeiffer und Kádár* beschäftigt sich seit vielen Jahren mit Verfahren zur simulationsbasierten Optimierung. Neben der Integration von Verfahren der KI in Simulationsmodelle und Methoden zur Echtzeitübertragung von Produktionsdaten wurde eine sehr detaillierte Methodik zum automatisierten Rescheduling basierend auf mittels Simulation identifizierten zukünftigen Abweichungen der Produktionsabläufe entwickelt. Für die Einschleusung der Optimierungsergebnisse wird ein MES als Schnittstelle zur Produktion eingesetzt. Energetische Aspekte werden in den simulationsaffinen Forschungsarbeiten jedoch ebenso wenig betrachtet wie OPC-UA-Informationsmodelle zur unmittelbaren Verknüpfung von Anlagen mit dem Simulationsmodell, da stattdessen auf eine automatische Modellgenerierung aus SPS-Code gesetzt wird. Auch wird in der Rescheduling-Methodik keine

„Voraussimulation“ genutzt, um den Produktionszustand an dem Zeitpunkt, ab dem die Optimierungslösungen errechnet sind, zu prognostizieren und als Input für die Optimierungsverfahren zu verwenden. [75, 278-282]

In Bezug auf die Themenstellung der vorliegenden Arbeit wurden folglich einzelne Forschungsbedarfe bereits in Publikationen anderer Institute adressiert. Jedoch wurden diese Fragestellungen oftmals nur isoliert betrachtet und nie in einem mit dem KS-Cockpit vergleichbaren, ganzheitlichen System integriert. Hinzu kommt, dass eine Abstimmung der aufgeführten Forschungsansätze auf die KS-Herstellung bisher nicht erfolgt ist. Besonders die Themen energetische Modellierung der Autoklavierung in DES, Voraussimulation, Modellierung von Energieverbräuchen in KS-Anlagen und laufzeiteffiziente Berücksichtigung von Schüttgut in DES wurden in keinem der Ansätze aufgegriffen. Ebenso wurden OPC-UA-Informationsmodelle nicht in einem Umfang betrachtet, wie es für die Bearbeitung der hier vorliegenden Forschungsbedarfe erforderlich ist.

### **Ableitung zu adressierender Forschungsfelder**

Die nachfolgenden Kapitel stellen nun unter Einbezug der abgegrenzten Publikationen Lösungsansätze für die genannten Forschungsbedarfe vor. Hierzu beinhaltet Kapitel 3 zunächst Lösungen, die im dargestellten Umfang auf einen Einsatz bei längerfristigen Problemstellungen mit einem Zeithorizont von mehreren Tagen bis Wochen ausgerichtet sind. Integriert man darin die in Kapitel 4 vorgestellten Verfahren, so eignet sich die Gesamtheit der Ansätze aufgrund der Automatisierung der Lösungsfindung in den Simulationsmodellen für die Verwendung bei mittelfristigen, taktischen Problemstellungen (Zeithorizont von wenigen Stunden bis Tagen). Für einen kurzfristigen, operativen Einsatz ist für diese Lösungen ein Simulationsmodell als Berechnungskern bereitzustellen, das zu jedem Zeitpunkt automatisiert den aktuellen Zustand der abgebildeten Produktion aufweisen kann. Hierzu ergänzt Kapitel 5 die notwendigen Methoden und Techniken, um mit dem KS-Cockpit optimierte Ergebnisse innerhalb weniger Minuten bis Sekunden bereitzustellen.



### **3 Effiziente Simulationsmodelle als operatives Werkzeug zur Identifikation und Bewertung von Verbesserungspotenzialen**

Eigenständige Optimierungsverfahren haben sich für den Einsatz in PPS-Systemen etabliert. Dennoch offenbaren sie diverse Schwachstellen, die durch den Einsatz von ereignisdiskreten Simulationsverfahren behoben werden können. Um eine Simulation als optimierendes Instrument in der PPS einsetzen zu können, wird im vorliegenden Kapitel zunächst eine geeignete Modellierung für hybride Fertigungsprozesse hergeleitet. Sie ist auf einen variablen Einsatz sowohl für längerfristige als auch für kurzfristige Fragestellungen auszulegen und für eine flexible Anwendung so zu gestalten, dass Anpassungen mit geringem Aufwand realisierbar sind. Zudem sind spezifische Anforderungen in hybriden Fertigungen, wie der Übergang von Schütt- auf Stückgut oder der materialflussrelevante Einfluss thermischer Prozesse, hinreichend präzise und laufzeiteffizient abzubilden (Abschnitt 3.1). Hierzu bedarf es einer detaillierten Integration vorliegender Energieflüsse im DES-Modell, wofür eine ganzheitliche Methodik von der Ermittlung relevanter Messwerte bis zur Implementierung dargelegt wird (Abschnitt 3.2). Besondere Betrachtung erfährt die Modellierung des Härteprozesses für Kalksandsteine in Abschnitt 3.3, da dieser durch komplexe thermodynamische Wechselwirkungen geprägt ist, die entscheidend auf den Produktionsablauf einwirken.

Einzelne Aspekte der nachfolgend aufgeführten Methoden wurden der Fachwelt bereits in internationalen Veröffentlichungen [P1, P7-P11] des Autors zugänglich gemacht. Ebenso sind Teile der Ausführungen in den nachfolgenden Abschnitten sowie deren Validierung in Abschnitt 6.1 den vom Autor begleiteten Arbeiten [S9, S11, S16, S18, S20, S21, S23, S25, S26, S30-S45], die am Lehrstuhl FAPS angefertigt wurden, entlehnt.

#### **3.1 Modellierung der Materialflüsse in Kalksandsteinwerken zur ereignisdiskreten Simulation**

Für die Erstellung eines allgemeingültigen DES-Modells für die Abbildung beliebiger KS-Werke ist in einem ersten Schritt der Einsatzzweck dieses Werkzeugs zu definieren. Auf dieser Grundlage kann über die Ableitung eines Referenzprozesses für die KS-Herstellung (s. Abschnitt 2.1.1) ein

Referenzmodell gebildet werden, das in Form einer Bibliothek aus Anwenderbausteinen zur Erstellung eines spezifischen Simulationsmodells zur Verfügung gestellt wird. Durch die generische Modellierung lässt es sich einfach auf spezifische Anwendungsfälle zuschneiden. Um allen Besonderheiten der KS-Herstellung gerecht zu werden, beinhaltet es geeignete Modellierungskonzepte für einen laufzeiteffizienten Umgang mit dem Übergang von Schüttgut auf Stückgut im Verlauf des Prozesses sowie für die realitätsgetreue Abbildung der thermodynamischen Wechselwirkungen des Härteprozesses.

### **3.1.1 Einsatzmöglichkeiten der Materialflusssimulation im Kalksandsteinwerk**

Wenngleich Simulationsverfahren häufig aufgrund zeitintensiver Konfigurationsaufwände nur zur Auslegung eines Systems in frühen Planungsphasen zum Einsatz kommen, weisen sie dennoch hohes Potenzial für die Anwendung für kurzfristigere taktische oder operative Fragestellungen auf. So eignen sie sich beispielsweise zur Unterstützung der PPS, die konventionell ausschließlich mithilfe von algorithmischen Optimierungsverfahren betrieben wird. Die Nutzung der Simulation bietet im Vergleich dazu folgende Vorteile (s. a. [134]):

- Einbezug von dynamischen Wechselwirkungen mit Nebenprozessen außerhalb des Betrachtungsbereichs des Optimierungsmodells
- Berücksichtigung nicht-trivialer Dynamiken bei gemeinsam genutzten Ressourcen (z. B. Verfügbarkeit der Schiebebühne bei gemeinsamer Nutzung für Be- und Entladung der Autoklaven)
- Eignung für flexible Fertigungssysteme durch intuitive Anpassbarkeit mittels visueller Darstellung der Modellierung in Benutzeroberflächen
- Variabler Detailgrad durch Einbezug zusätzlicher Informationen
- Visualisierungs- und Experimentiermöglichkeit

Durch das Vorliegen eines grundlegenden Simulationsmodells aus der Planungsphase sind im Vergleich zur Neuerstellung nur geringfügige Anpassungen für einen operativen Einsatz erforderlich. Einerseits ist je nach Zielstellung ein höherer Detailgrad vorzusehen, um auch im kurzfristigen Rahmen signifikante Auswirkungen von Veränderungen zu erkennen. Andererseits sinkt die verfügbare Zeit für die Vorbereitung und Durchführung der Simulationsläufe (insbesondere die Parametrisierung und Laufzeit des Modells), da bei kürzeren Planungshorizonten das Aufsetzen auf dem gegenwärtigen Ist-Zustand entscheidend wird. Demzufolge ist das Modell je nach Fristigkeit des Simulationsziels um Funktionen wie

- laufzeitreduzierende Modellierungsansätze,
- automatische Szenariengenerierung oder
- automatisierte Modellparametrisierung in Echtzeit

zu erweitern. Tabelle 8 führt Einsatzzwecke der DES in KS-Werken für unterschiedliche Planungshorizonte auf und unterlegt sie mit den jeweiligen Rahmenbedingungen für das DES-Modell. Deren Umsetzung wird in den nachfolgenden Abschnitten erläutert. Als Zielgrößen werden dabei für die KS-Herstellung insbesondere folgende, zum Teil im Widerspruch stehende (s. a. Abschnitt 2.1.4) Kriterien angesetzt:

- Minimierung des Primärenergie- und Personaleinsatzes
- Maximierung des Gesamtoutputs pro Planungsperiode
- Nachfragebasierte Fertigung trotz technologiebedingt großer Lose
- Hohe Lieferfähigkeit bei niedrigen Beständen (Losgrößenoptimierung)
- Minimierung von Rüstkosten
- Vermeidung von Blockadesituationen

Tabelle 8: Richtwerte für die Fristigkeit des Simulationseinsatzes bei verschiedenen Planungshorizonten

Einsatz	Planungshorizont	Zeitraumen für die Simulationsstudien	Dauer bis zur Ergebnisumsetzung
Strategisch (langfristig)	mehrere Monate bis Wochen	mehrere Wochen bis Monate	mehrere Wochen bis Monate
Taktisch (mittelfristig)	mehrere Wochen bis Tage	mehrere Minuten bis Stunden	wenige Stunden bis Tage
Operativ (reaktiv)	wenige Tage bis Minuten	wenige Sekunden bis Minuten	wenige Sekunden

### Strategischer Einsatz der Simulation

Bei strategischen Problemstellungen finden Simulationsstudien häufig Einsatz, indem sie zur Absicherung und Verbesserung von Prozessen und Systemen in der Planungsphase herangezogen werden. Für die KS-Herstellung dienen sie vornehmlich zur Analyse folgender Fragestellungen:

- Optimales Layout in Bezug auf den Materialfluss beim Werksneubau
- Einfluss von Neuinvestitionen auf den Materialfluss
- Auswirkung einer zu-/abnehmenden Variantenzahl auf den Produktionsprozess
- Optimale Auslastung der Anlagenkapazitäten (in Zeiten geringer Nachfrage)

Diese Anforderungen verlangen bei der Erstellung von Simulationsmodellen vor allem einen zielgerechten Detailgrad in der Modellierung und eine einfache Anpassbarkeit für verschiedene Produktionsszenarien. Dies wird in den nachfolgenden Abschnitten des vorliegenden Kapitels im Detail behandelt.

### **Taktischer Einsatz der Simulation**

Zur Unterstützung der Bewertung alternativer Szenarien im Hinblick auf die Erreichung kurz- bis mittelfristiger Produktionsziele wird die Simulation oftmals in der Produktionsplanung und -steuerung eingesetzt. Hier treten bei der Herstellung von KS insbesondere folgende Anforderungen auf:

- Festlegung optimaler Losgrößen zur Erreichung der Produktionsziele
- Reihenfolgeplanung an den Pressen zur Erreichung minimaler Rüstzeiten und Einhaltung von Kapazitätsgrenzen
- Geeignete Beladungsstrategien für die Autoklaven zur Erreichung des vorgegebenen Durchsatzes unter Berücksichtigung von Ressourceneffizienzzielen
- Analyse der erforderlichen Schichtbelegung bei vorgegebenem Output
- Dynamische Verfügbarkeitsprognose auf Basis von Produktionsplänen
- Notfallstrategien für Anlagenausfälle oder andere Störungen/Abweichungen

Um derartige kurzfristige Einsätze zu ermöglichen, ist das aus der Planungsphase im Regelfall bereits vorliegende DES-Modell um zusätzliche Funktionen zu erweitern. Zum einen sollte es nicht mehr ausschließlich auf Planungsdaten beruhen, sondern auch Daten und Informationen aus dem realen Betrieb beziehen. Zum anderen ist die Simulation um Optimierungsalgorithmen zu ergänzen, die eine automatisierte Szenariengenerierung vollziehen und dabei ergebnisbasiert Entscheidungen für den weiteren Optimierungsablauf treffen. Derartige Methoden sind in Kapitel 4 näher erläutert.

### **Operativer Einsatz der Simulation**

Durch die zunehmende Durchgängigkeit der Modellerstellung und Datenanbindung eignet sich die Simulation auch für den unmittelbaren Einsatz bei auftretenden Störfällen und Abweichungen im realen Betrieb. Sie hilft

längerfristige Auswirkungen vorherzusehen, hierfür alternative Ablaufvarianten zu generieren, zu bewerten und demzufolge zielorientiert zu reagieren. Sie bietet in der KS-Produktion besonders für folgende Anwendungsfälle Einsatzpotenzial:

- Reaktion auf unvorhergesehene Planabweichungen (z. B. qualitäts-, versorgungsbedingt) (s. a. „resiliente Fabrik“ [263])
- Reaktion auf Anlagenausfälle
- Unterstützung der vorausschauenden Instandhaltung
- Optimierte Integration von Eilaufträgen

Soll die Simulation operativ eingesetzt werden, ist das DES-Modell eigenständiger und reaktiver zu gestalten. Durch die Integration von Echtzeitdaten aus dem Betrieb kann sichergestellt werden, dass stets auf dem aktuellen Zustand des Realsystems aufgesetzt wird und so kurzfristig umsetzbare Lösungen generiert werden. Zudem ist eine Methodik zu implementieren, die Anpassungsvorgänge an geeigneter Stelle initiiert und adäquat für das Realsystem vorbereitet. Dabei werden Bewertungsfunktionen eingesetzt, um stets auf die vorgegebene Zielstellung hinzuarbeiten. Zuletzt ist eine Verknüpfung zu den ausführenden IT-Systemen herzustellen, um die errechnete optimierte Auftragssteuerung automatisiert in die Produktion einsteuern zu können. Die Ausgestaltung dieser Anpassungen ist in Kapitel 5 ausführlich dargelegt.

### 3.1.2 Abbildung des Produktionsprozesses in einem generischen Baukasten-Modell

Als gängige Hinderungsgründe für die Verwendung von DES zur Optimierung betrieblicher Abläufe gelten ein hoher Zeit- und Kostenaufwand zur Modellerstellung sowie hierfür erforderliches Spezialwissen. Um dem entgegenzuwirken, kann man den gesamten Modellierungsprozess mittels bausteinbasierter Referenzmodelle (vgl. [148]) vereinfachen. Deren Entwicklung und Implementierung rechnet sich insbesondere, wenn dafür vielfältige Einsatzfelder (z. B. Standardprozesse, diverse Werke, verwandte Branchen) vorliegen.

#### Referenzprozess

Für die KS-Branche ergibt sich der Vorteil, dass aufgrund weniger Anlagenbauer deutschlandweit in nahezu allen Werken ähnliche Materialflüsse vorliegen. So lassen sich die Herstellungsprozesse aller Werke in einem generischen Referenzmodell vereinheitlichen. Der in Bild 34 dargestellte Referenzprozess ist aus einer Analyse der KS-Produktionsstätten von sieben

Unternehmensgruppen, die insgesamt 31 von 79 im Jahr 2017 in Deutschland betriebenen Werken (vgl. [45]) unter sich vereinen, abgeleitet.

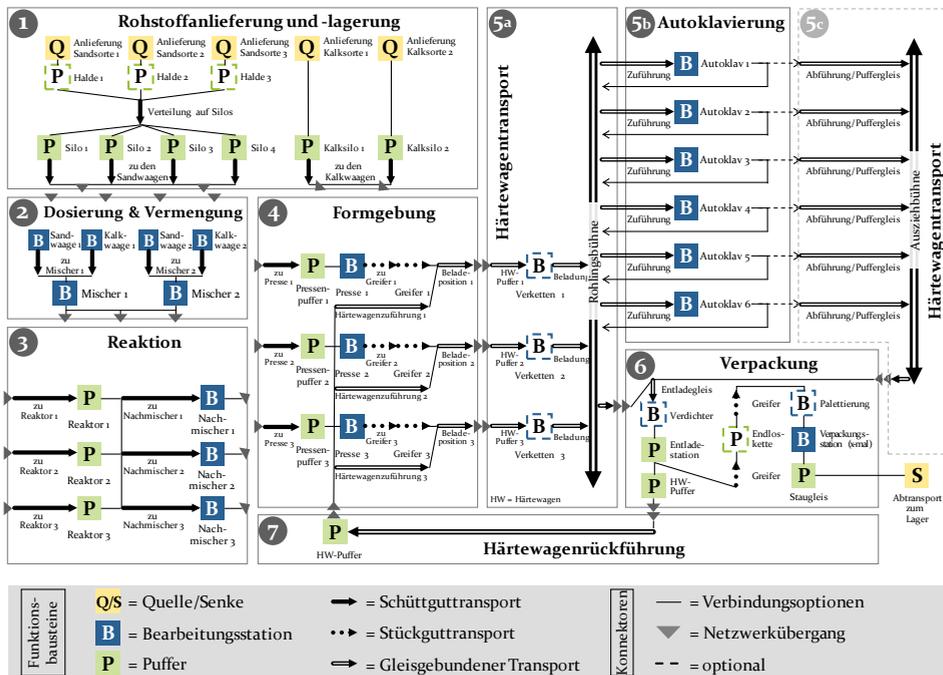


Bild 34: Referenzprozess der KS-Herstellung zur generischen, bausteinbasierten DES-Modellerstellung

Die Prozessdarstellung ist so gewählt, dass ein direkter Bezug zur grafischen Modellierung in DES-Programmen hergestellt werden kann. Die Anzahl paralleler Anlagen ist hierbei exemplarisch und variiert in Abhängigkeit der vorliegenden Systemleistung und des erforderlichen Gesamtoutputs. Für Einzelheiten zu den Produktionsprozessen selbst sei auf Abschnitt 2.1.1 verwiesen.

## Referenzmodell

Auf Basis des Referenzprozesses lassen sich unter Verwendung von Grundbausteinen generische Anwenderbausteine erstellen. Zur Modellierung werden sie in einer Bibliothek bereitgestellt und stellen zusammengesetzt in einzelnen, untereinander verknüpften Teilmodellen (Bild 34: 1-7) ein Referenzmodell dar. Dessen Grundaufbau ist in Bild 35 skizziert. Neben der Materialflussstruktur sind in einem solchen Modell auch Ablaufprozeduren hinterlegt, die den Weg der beweglichen Elemente (BE) durch das Produktionsnetzwerk bestimmen und deren Verhalten steuern. Zuletzt ist

dieses funktionale Modell mit Parametern, Attributen und Informationen zu versorgen, was mittels eines angeknüpften Datenreferenzmodells ebenso generisch realisierbar ist.

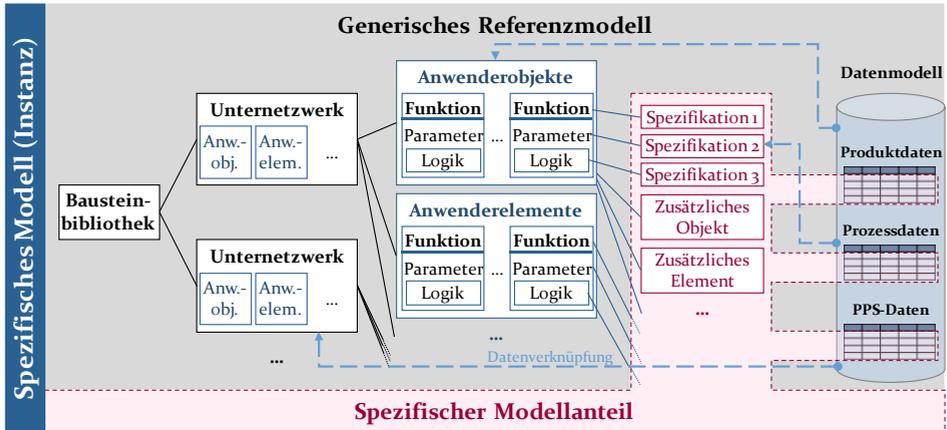


Bild 35: Aufbaustruktur des DES-Referenzmodells

## Generische Modellierung

Um das Modell generisch zu halten, sind bausteinindividuelle Ablaufprozeduren (Methoden/Logik) und Attribute/Parameter statt zentral im Netzwerk direkt in den Anwenderobjekten hinterlegt, um nur bei Instanziierung des Bausteins einzugreifen und die direkte Verknüpfung zu diesem sicherzustellen. Die generische Adressierung von Bausteinen aus bausteinübergreifenden Methoden gelingt über den Einsatz von Auto-Inkrementierung in der Objektbezeichnung (z. B. Autoklav1, Autoklav2 usw.) oder in den Identifiern, auf die aus dem Programmcode heraus verwiesen wird. Da hinter der Verwendung von Sack- beziehungsweise Durchzugskesseln völlig unterschiedliche Materialflusskonzepte stecken, werden diese nicht generisch in einem, sondern separat in zwei Unternetzwerken angelegt. Dies vermeidet unnötige Komplexität und ermöglicht dem Anwender eine flexiblere Modellierung. Aus gleichem Grund werden für einzelne Objekte feste Vorgänger vorgegeben, auf deren Verhalten der Ablauf des nachfolgenden Bausteins in der Simulation aufbaut. Werden diese Vorgänger vom Nutzer bei der Modellierung nicht eingesetzt, generiert das Modell diese selbst als Dummy-Bausteine ohne Einfluss auf den Materialfluss (z. B. Bearbeitungszeit o Sekunden).

Dank der Anbindung des *Datenmodells* ist es ebenso möglich, Echtzeitinformationen zu Betriebszuständen, WIP, Auftragslisten, Warteschlangen, verbleibenden Bearbeitungszeiten u. a. ohne zusätzlichen Eingriff in das

DES-Modell zu integrieren. Zur Reduzierung der Laufzeit sind Optionsfelder vorgesehen, um Daten nur im Falle einer Änderung zu übertragen. Dieser manuelle Schritt kann bei Einsatz einer dienstbasierten Kommunikationsschnittstelle durch Einrichtung von Benachrichtigungsfunktionen (vgl. OPC UA Data Change Notification) ersetzt werden. Den Unternetzwerken zugeordnete Initialisierungsmethoden sorgen dafür, dass das Simulationsmodell zu Beginn eines jeden Simulationslaufs zunächst auf einen neutralen Grundzustand zurückgesetzt (z. B. BE entfernt, Hilfstabellen leer, Attributwerte zurückgesetzt) und anschließend mit allen erforderlichen Daten parametrisiert wird (*Spezifisches Modell*).

Besonders herausfordernd stellt sich bei der Erstellung von Referenzmodellen oder DES-Modellen im Allgemeinen die Berücksichtigung von manuellen Eingriffen in das Produktionsgeschehen dar. Hierzu sind die vom Menschen oft intuitiv getroffenen Entscheidungen geeignet zu formalisieren. Bei der KS-Herstellung betrifft das insbesondere Beladungs- und Dampfüberleitstrategien beim Härteprozess (s. Abschnitt 3.1.4) sowie das Einsteuern von Fertigungsaufträgen. Denn bei Rüstwechseln an den Pressen ist zu beachten, dass die Nachschubanforderung bei den vorgelagerten Prozessen (Dosierung, Vermengung und Reaktion) oftmals rein sensorgesteuert abläuft. Unterschreitet der Füllstand im Pressenpuffer oder im Reaktor einen Grenzwert, so wird bei der vorgelagerten Anlage (Reaktor bzw. Mischer) eine neue Charge angefordert. Steht nun aber ein neuer Fertigungsauftrag an einer Presse an, so ist aufgrund der langen Vorlaufzeit (u. a. etwa 90 Minuten Reaktion des Gemischs im Reaktor) frühzeitig der Nachschub nach dem bisherigen Rezept einzustellen und unter Berücksichtigung der Rüstzeit auf das Rezept der neuen Steinsorte umzustellen. Hierbei gilt es zu beachten, dass der voraussichtlich in der Restlaufzeit des Auftrags anfallende Ausschuss an den Pressen einkalkuliert wird, um ausreichend Material für Gutteile vorliegen zu haben. Die Zeitpunkte für diese Rezeptumstellung werden oftmals vom Werker auf Basis seines Erfahrungswissens festgelegt und umgesetzt. Restmaterial des vorherigen Auftrags wird nach dem Umrüsten als Anfahrausschuss zur Maschineneinstellung verwendet. In der DES sind diese Entscheidungen aber mittels festgelegter Prozeduren automatisiert zu integrieren. Dieser gesamte Programmablauf für die Materialanforderungen im KS-Werk ist in Bild 36 in einem Flussdiagramm dargestellt.

Mithilfe der aufgezeigten Ablauflogik wird versucht, das reale Vorgehen möglichst detailliert nachzubilden. Daher wird auch die Dauer des Aufenthalts der Materialchargen im Reaktor nur in Attribute geschrieben und hat keine Auswirkung auf den simulierten Materialfluss. Dies entspricht dem

realen Vorgehen im Werk, wo die Einhaltung der Reaktionszeit über eine angemessene Einstellung des Auslösebestands im Reaktor sichergestellt sein soll. Eine Blockade des Reaktorausgangs bis zum Verstreichen der Reaktionszeit erfolgt jedoch in der Regel nicht. Die induzierten Qualitätsmängel treten erst nach dem Härten zutage. Demgemäß wird erst in der Auswertung der Simulationsläufe auf Chargen mit unterschrittener Mindestreaktionszeit hingewiesen.

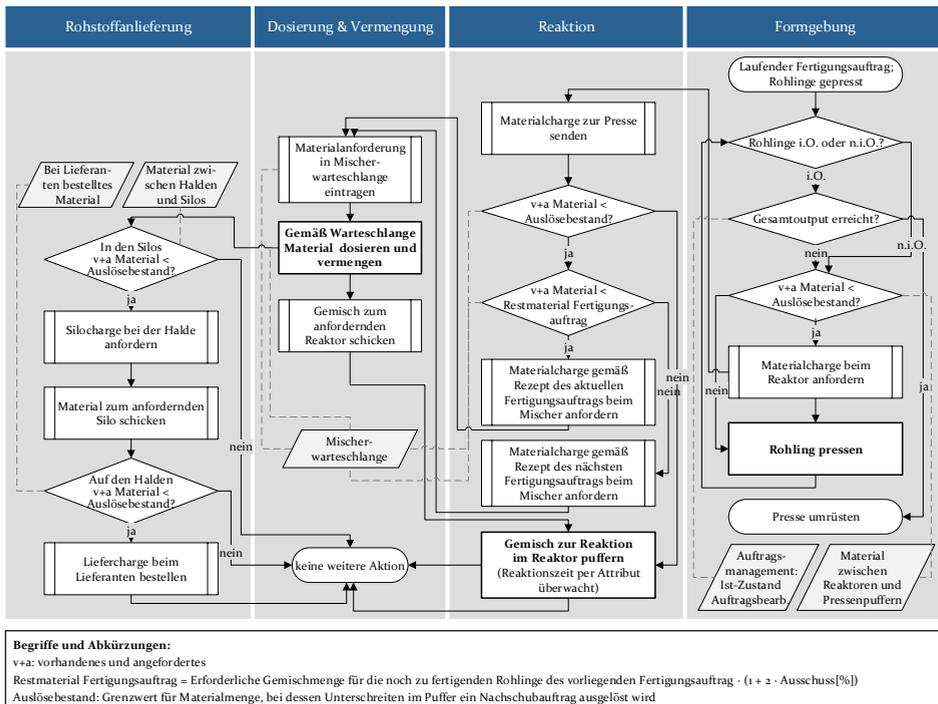


Bild 36: Ablauf des Auftragsmanagements in der Simulation als Flussdiagramm

Trotz Vorliegen eines determinierten Referenzmodells sind durch die Instanzierbarkeit aller Bausteine und Ablaufroutinen auch individuelle Anpassungen an unternehmensspezifische Prozesse weiterhin möglich. So lässt sich die Produktion von Passsteinen, die durch passgenaues Zusägen der Rohlinge nach dem Pressen hergestellt werden, in das Modell integrieren. Hierfür ist lediglich die spezifische Passsteinlinie im Unternetzwerk „Formgebung“ (Bild 34: ④) als separate Linie zu integrieren und – wie auch im realen Werk – ein zugeschnittener Verpackungsbereich (Bild 34: ⑥) zusätzlich einzufügen. Beliebige weitere Anpassungen sind ebenfalls bei bestehender Modellkenntnis realisierbar.

### **3.1.3 Integrierte Modellierung von Schüttgut und Stückgut in einer ereignisdiskreten Simulation**

Wie in Abschnitt 2.1.3 ausgewiesen, handelt es sich bei der KS-Herstellung um eine hybride Produktion, die bis zu den Pressen Schüttgut und anschließend Stückgut verarbeitet. Analog zur Automatisierungstechnik stellt dies auch für die Materialflusssimulation eine Herausforderung dar. DES basieren auf mathematischen Verfahren, die aufgrund ihres diskreten Verarbeitungscharakters auf die Behandlung von Stückgütern ausgelegt sind. Schüttgütern hingegen lässt sich wie auch Flüssigkeiten nicht sinnvoll ein diskretes Raster auferlegen, in dem Zustandsänderungen eintreten können (vgl. Füllstandsänderung in einem Wasserbehälter), weshalb hierfür üblicherweise kontinuierliche Simulationsverfahren eingesetzt werden.

Um Schütt- und Stückgut dennoch in derselben Simulationssoftware zu behandeln, sind die erforderlichen Charakteristika der Materialströme auf die jeweilige Modellierungsform zu übertragen. Einen alternativen Ansatz bietet die mesoskopische Simulationsmodellierung (vgl. [145]), die jedoch nicht die erforderliche Abbildungsgenauigkeit für Materialflussuntersuchungen im operativen Einsatz aufweist und für die nur anwendungsspezifische Software vorliegt. Andere Materialflusssimulationssoftware, wie TECNOMATIX Plant Simulation der Firma Siemens ab Version 12, bietet die Möglichkeit, die Prozessierung von Flüssigkeiten in der DES abzubilden. Dieses Modul ist jedoch nicht in der Lage, Chargen in einem Behälter zu differenzieren. Demnach eignet es sich nicht für die Abbildung der schüttgutbezogenen Prozesse bei der KS-Herstellung, da beispielsweise die individuellen Rest-Reaktionszeiten der einzelnen Chargen des Gemischs so nicht überwacht werden können. In anderen KS-ähnlichen Anwendungen (vgl. Abschnitt 2.1.3) wird Schüttgut vereinfacht ohne vorherige Prozessierung als einzelnes Element zugeführt (vgl. [41]). Dies ist möglich, da dort ein nicht so hoher Detailgrad wie für die KS-Herstellung erforderlich ist.

Für Materialflusssimulationen sind weitaus mehr Softwaretools mit ereignisdiskreten Prozessmodellen verfügbar als mit anderen Prozessmodellen. Dies ist darin begründet, dass diese sehr intensiv in der Industrie eingesetzt werden, zum Beispiel um physische Materialflüsse in Fertigungswerken zu planen oder zu optimieren. Zudem reagiert im Regelfall der Stückgutfluss im KS-Werk sensibler auf Abweichungen als der Bereich vor den Pressen (Schüttgut), weshalb dort ein höherer Detailgrad erforderlich ist. Daher wird im Folgenden ein Konzept für die Implementierung des Schüttgutverhaltens in einem DES-Modell vorgestellt, das in Teilen bereits vom Autor in [P1] veröffentlicht wurde.

Nachdem in DES unterscheidbare und zählbare Elemente prozessiert werden, bietet es sich an, Schüttgut in Chargen zu diskretisieren und diese als Elemente in der Simulation einzusetzen. Hierbei ist jedoch von hoher Relevanz, eine passende Chargengröße zu wählen, um nicht bei zu kleinen Chargen aufgrund der großen Anzahl an zu prozessierenden Elementen den Ereignisverwalter stark auszulasten und so die Laufzeit in die Höhe zu treiben (vgl. [P1]). Bei zu großen Chargen hingegen leidet die Präzision der Modellierung, da Ereignisse auf die gesamte Charge angewendet werden, selbst wenn sie in der Realität nur einen Teil betreffen (vgl. Bild 37: b-d).

Zur Modellierung von Schüttgut in DES sind diverse Varianten denkbar, wovon folgende fünf, die sich über das gesamte Spektrum an Chargengrößen verteilen, in Bild 37 dargestellt sind:

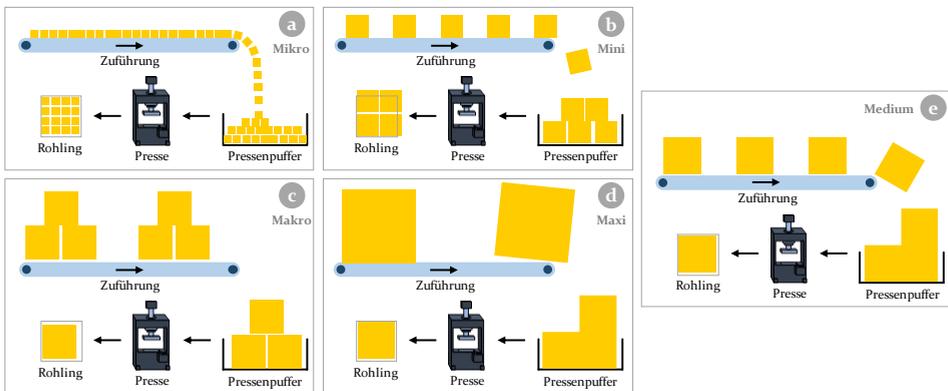


Bild 37: Varianten der Schüttgutmodellierung in DES

- (a) *Mikro*: Die Chargengröße ist so klein, dass sich aus den Elementen jedes je in der Simulation zu prozessierende Stückgut zusammensetzen lässt. Nimmt man an, dass KS auf ein Kilogramm genau in der Simulation erfasst sind, so entspräche ein Schüttgutelement 1 kg Gemisch.
- (b) *Mini*: Im Vergleich zur *Mikro*-Variante verwendet man größere Chargen, mit denen man sich an das tatsächliche Volumen/Gewicht des Stückguts annähert (KS: z. B. 6 kg)
- (c) *Makro*: Man legt bei der Erzeugung des Elements die Chargengröße auf den Wert fest, der dem Volumen/Gewicht des später daraus entstehenden Stückguts entspricht. Bei Zusammensetzung des Stückguts aus mehreren verschiedenen Schüttgütern, wählt man den entsprechenden Anteil als Chargengröße.

- (d) *Maxi*: In einem Baustein liegt – auch wenn eine Unterscheidung (z. B. Reihenfolge, Sorte) erforderlich ist – nur ein Element vor, das dem gesamten enthaltenen Schüttgut entspricht. Der Inhalt wird in einem benutzerdefinierten Elementattribut (Inhaltstabelle) gespeichert. Man generiert dann am Ausgang eines jeden Bausteins ein Element mit einer Chargengröße, die der nachfolgende Baustein angefordert hat, oder die für ihn vorgesehen ist.
- (e) *Medium*: Analog zur *Maxi*-Variante generiert man Elemente beim Austritt des Materials aus dem Baustein. Die Charge wird jedoch weiter zerlegt in Einheiten, die exakt das Volumen/Gewicht aufweisen, das im nächsten Bearbeitungsschritt weiterverarbeitet wird. Bei Förderbandtransporten werden die einzelnen Einheiten verteilt über die gesamte Transportzeit abzüglich der Bandaufenthaltszeit generiert, um einen kontinuierlichen Fluss nachzubilden.

Die *Mikro*-Variante eignet sich nur, wenn die Dauer des Simulationslaufs nicht von Relevanz ist oder alle Stückgüter aus derselben Menge an Schüttgut (oder ein Vielfaches davon) bestehen. Wenn Rundungsfehler bei der Aggregation von Schüttgutelementen akzeptiert werden können, kann Variante (b) in Betracht gezogen werden. Variante (c) ist nur möglich, wenn im Voraus bekannt ist, in welches Stückgut das generierte Schüttgutelement eingehen wird. Dies ist jedoch in der Regel nicht zuverlässig möglich, respektive ist bei einem solch deterministischen Verhalten ein Simulationsansatz für gewöhnlich nicht erforderlich. Einen wesentlichen Vorteil hinsichtlich der Laufzeit bietet die *Maxi*-Variante. Sie weist jedoch Defizite in der Abbildung von Transportvorgängen auf, indem

- ein Förderband als gemeinsam genutzte Ressource mehrerer Bausteine in der Simulation bereits wieder freigegeben ist, während das Material in der Realität noch befördert wird,
- Material bereits in einer Menge beim nachfolgenden Baustein angekommen und verarbeitbar ist, das sich zum Großteil eigentlich noch auf dem Transportweg befindet, oder umgekehrt noch auf dem Transportweg ist, während es in der Realität schon verarbeitet werden kann, oder,
- bei vorgesehenem kontinuierlichem Abfluss aus einem Folgebaustein, dessen Fassungsvermögen für die Aufnahme des Elements bei dessen Ankunft zu klein ist.

Für die Abbildung der KS-Herstellung wird entsprechend Variante (e) favorisiert. Hierbei wird Bearbeitungsstationen immer die benötigte Menge

des Schüttguts als Element aus einem Puffer zugeführt. In einem Pufferbaustein, der nicht ohne zwischenliegenden Transport an eine Bearbeitungsstation gekoppelt ist, liegt stets nur ein Element vor, dessen Inhaltsliste Informationen zur Sorte, Menge und dem Ankunftszeitpunkt u. a. der Schüttgutcharge enthält. So lassen sich auch Mindestaufenthaltszeiten berücksichtigen. Bei Ankunft beziehungsweise Verlassen einer bestimmten Menge wird die Tabelle entsprechend ergänzt, angepasst oder reduziert und das ankommende Element vernichtet, respektive ein abgehendes erzeugt.

Transporte, die nicht chargenweise (z. B. Becherwerk, Behälter) sondern kontinuierlich (z. B. Förderband) erfolgen, erfordern für den Ausschluss der Nachteile von Variante (d) ein gesondertes Konzept, das in Bild 38 exemplarisch erläutert wird. Fordert der Pressenpuffer beim Unterschreiten des Auslösebestands Material vom Reaktor an, so generiert dieser Elemente in einer Größe (30 kg), wie sie in der nachfolgenden Bearbeitungsstation verarbeitet werden, bis die angeforderte Bestellcharge (120 kg) erreicht ist. Restmengen werden in entsprechend kleinerer Größe erzeugt. Die Elemente übergibt er beginnend nach einer Zeit  $t_{dis}$  in einem Abstand von

$$t_{dis} = \frac{\text{reale Chargentransportzeit} - \text{Bandaufenthaltszeit}}{\frac{\text{Bestellcharge}}{\text{Liefercharge}}} = \frac{50 \text{ s} - 10 \text{ s}}{\frac{120 \text{ kg}}{30 \text{ kg}}} = 10 \text{ s} \quad (3.1)$$

zum vorherigen Transportvorgang an das Förderband. Für Restmengen errechnet sich mit derselben Formel ein entsprechend kürzerer Abstand.

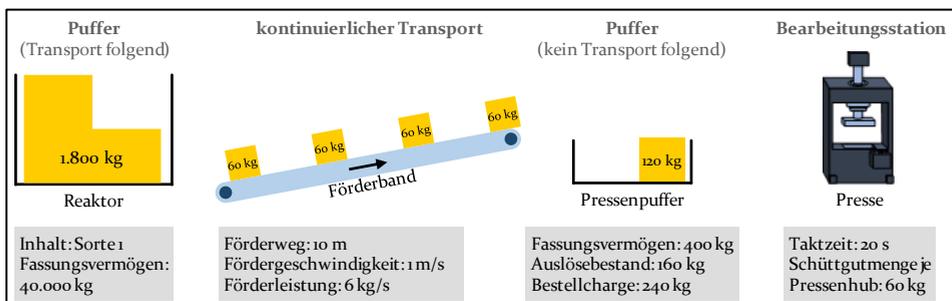


Bild 38: Transportkonzept für Schüttgut in DES

Mit diesem Konzept ist sichergestellt, dass Schüttgut erst dann an einer Bearbeitungsstation in der DES verarbeitbar ist, wenn es auch in der Realität in dieser Menge ankäme. Existiert vor der Bearbeitungsstation ein Vorpuffer ohne nachfolgende Transportzeit (Pressenpuffer), so werden die an-

kommenden Elemente dort wieder aggregiert, um Fehlern in der Simulation beispielsweise bei Formatwechseln vorzubeugen. Beim Ausgang aus diesem Puffer wird wieder die Verarbeitungscharge gebildet und ohne zeitlichen Abstand bereitgestellt.

### 3.1.4 Anforderungsdefinition für die Härteprozessmodellierung

Die Autoklavierung von KS stellt einen Prozess dar, der mit Standardbausteinen in DES für die meisten Anwendungsfälle nicht hinreichend genau modellierbar ist. Zwar werden in den Härtekesseln keine Veränderungen an den Elementen vorgenommen, die Einfluss auf den weiteren Materialfluss nehmen (z. B. Füge-/Vereinzelungsoperationen), aber die Prozessdauer lässt sich nicht vorab produkt- oder prozessabhängig festlegen. Sie ergibt sich in der Realität vielmehr durch das Zusammenwirken vielfältiger Einflussfaktoren, die nur zum Teil direkt beeinflussbar sind (s. Bild 39).

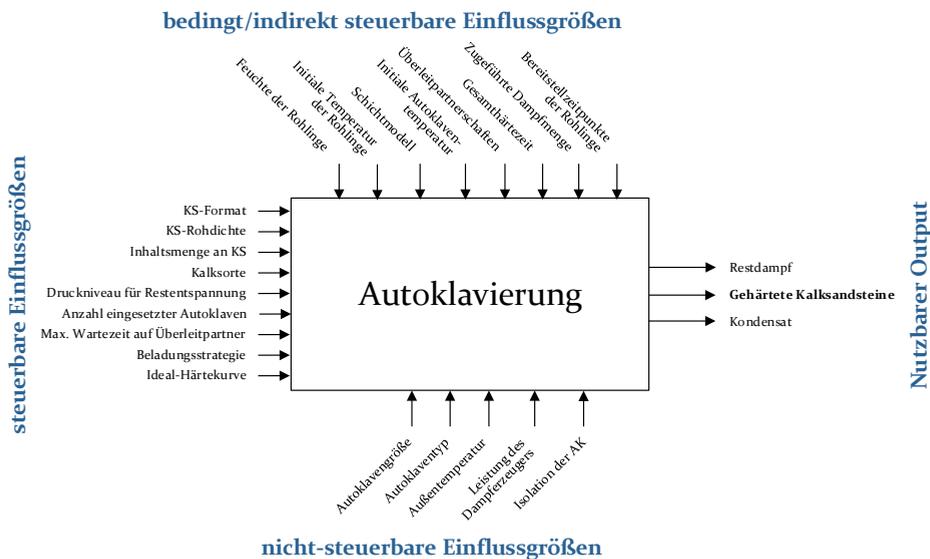


Bild 39: Einflussfaktoren auf den Autoklavierungsprozess

Als oberste Prämisse beim Härten der Rohlinge gilt die maximal mögliche Einsparung thermischer Energie insbesondere durch deren Wiederverwertung mittels Dampfüberleitung zwischen Autoklaven in der Abkühlungs- (Spender) und der Aufheizphase (Empfänger). Die insgesamt zuzuführende Dampfmenge wird von der Ausnutzung des inneren AK-Volumens, die wiederum vom KS-Format, der Rohdichte und dem Stapelbild auf den Härtewagen abhängig ist, sowie der initialen Temperatur der beteiligten

Medien und der Isolation der AK gegenüber der Umgebung beeinflusst. Bei niedriger Außentemperatur stellt sich dieser Faktor als umso gewichtiger dar.

Um die initiale Wärmeenergie in den Rohlingen zu konservieren, werden Maßnahmen zum Erhalt der Reaktionswärme in den Steinen, wie das Abdecken beladener Härtewagen außerhalb der Autoklaven oder ein zügiger Start des Härtvorgangs durch gemischte Beladung (s. hierzu Abschnitt 2.1.1), in Betracht gezogen. Das Auskühlen der AK soll durch folgende Maßnahmen reduziert werden:

- Minimaler Einsatz an für das Erreichen der Produktionsziele erforderlichen Autoklaven
- Zügiges Schließen der Autoklaventüren
- Vermeidung der gleichzeitigen Öffnung beider Türen bei Durchzugskesseln

Die minimale Prozessdauer für das Härten von KS ist aus Produktsicht von deren Format und Rohstoffzusammensetzung und aus Prozesssicht vom vorherrschenden Druck bzw. der Temperatur im AK abhängig. Demzufolge liegen für alle Steinsorten spezifische Soll-Härtekurven vor (s. Bild 40). Diese geben den maximalen Druckanstieg in der Aufheizphase, den maximalen Druckabfall in der Abkühlungsphase, den Maximaldruck sowie das zu erreichende Produkt aus Druck und Zeit über den Zeitverlauf (= Integral unter der Kurve in Bild 40) vor. Werden unterschiedliche Steinsorten in demselben Kessel gehärtet, so ist eine Soll-Härtekurve anzusetzen, die die Anfahr- und Abkühlrestriktionen aller enthaltenen KS einhält sowie das größte Integral der sortenspezifischen Soll-Härtekurven aufweist. Entsprechend ist die sortenreine Beladungsstrategie in der Gesamtbetrachtung unter Vernachlässigung der Abkühlung der beteiligten Komponenten stets mit dem geringsten Energieeinsatz verbunden. Trotz allem ist im Betrieb die Einhaltung einer Soll-Härtekurve aufgrund der empfohlenen Nutzung der Dampfüberleitung im Regelfall nicht realisierbar respektive ökonomisch sinnvoll, sodass sich länger andauernde Härtekurven, wie in Bild 6 skizziert, ergeben.

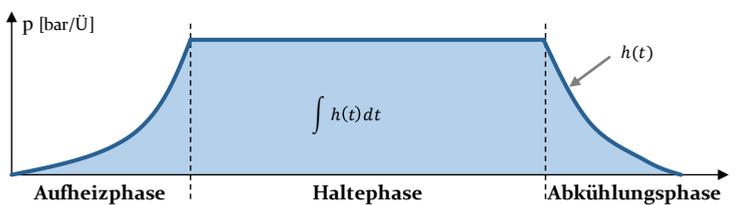


Bild 40: Soll-Härtekurve ohne Berücksichtigung energetischer Einsparpotenziale

Neben der Fokussierung auf die Energieoptimierung sind auch andere Produktionsziele zu berücksichtigen. Hierzu sind verschiedene Steuerungsparameter für die Dampfüberleitung variierbar. So können die maximale Wartezeit auf einen Spender- oder Empfängerkessel für den Dampfüberlass oder der zu erreichende Druck für den Start der Restentspannung angepasst werden, um beispielsweise den geforderten Tagesdurchsatz zu erreichen. Auch für die Überbrückung produktionsfreier Tage existieren spezielle Härtekurven, um nicht mehr als die erforderliche Dampfmenge für lange Härtezeiten zuzuführen. Hierzu wird die Haltephase soweit verkürzt bzw. teils auch der maximale Druck so reduziert, dass bei abgeschlossenen Kesseln das Integral der über die produktionsfreien Tage gestreckten Kurve trotz kontinuierlich abfallendem Druck für die vollständige Härtung ausreicht.

Um all die genannten Einflussfaktoren und Eingriffsmöglichkeiten in der DES zu berücksichtigen, sollten folgende Abhängigkeiten der Bearbeitungszeit modelliert sein:

- Sortenspezifische Härtekurven
- Alternative Härtekurven vor produktionsfreien Tagen
- Bei gemischter Beladung eines Autoklavs: Wahl der Härtekurve mit den kleinsten Gradienten und größtem Integral der enthaltenen KS
- Begrenzung der Wartezeit auf Dampfüberleitung
- Zeitgleiche Druckbeaufschlagung abhängig von der Leistung des Dampferzeugers
- Variierbarkeit der Druckgrenze für die Einleitung der Restentspannung
- Abhängigkeit des Druckausgleichs von Rohlings- und AK-Temperaturen
- Abhängigkeit des Temperaturverhaltens von der Außentemperatur, der AK-Isolation und den Türöffnungszeiten

Zur Berücksichtigung dieser Aspekte bei der Bestimmung der Bearbeitungszeit in den AK bieten sich verschiedene Modellierungsansätze an, die sich im Modellierungsaufwand sowie der Präzision der Abbildung differenzieren. Die einfachste Option stellt die Verwendung fixer Bearbeitungszeiten für die AK-Bausteine in Abhängigkeit des Inhalts (sortenspezifisch) und des Wochentags dar. Leiten sich diese Zeiten von Durchschnittswerten vergangener Autoklavenreisen ab, so integrieren sie zu einem gewissen Maße implizit auch den zeitlichen Einfluss der Dampfüberleitung. Dennoch bildet diese Variante das reale Verhalten noch relativ ungenau ab. Als Alternative können die thermodynamischen Zusammenhänge des

Dampfsystems mittels physikalischer Formalisierung approximiert werden, wie es in Abschnitt 3.3 erläutert wird. Dies erfordert Kenntnis über den thermischen Zustand der in den Härteprozess eingehenden Komponenten, was im nachfolgenden Abschnitt hergeleitet wird.

### **3.2 Energieflüsse im Herstellungsprozess für Kalksandsteine**

Für die Integration von Energieflüssen in eine DES existieren bislang keine vollständigen generischen Ansätze, die alle Energiearten einbeziehen. Zudem hängen Energieverbräuche oftmals von vielen individuellen Einflussfaktoren ab, sodass für einen hinreichenden Detailgrad jeder Anwendungsfall spezifisch zu betrachten ist. In der KS-Herstellung liegen Energieflüsse vorwiegend in Form von elektrischen und thermischen Strömen vor. Nahezu alle Anlagen benötigen für deren Betrieb elektrischen Strom, dessen Bedarf abhängig von der Nutzung der Anlage ist. Da dies besonders bei den Hauptverbrauchern hohe Relevanz für Einsparungen besitzt, wird diese Abhängigkeit in der Simulation modelliert. Auch die thermischen Energieflüsse in Form der Erwärmung des Gemischs bedingt durch die exotherme Reaktion von Branntkalk mit Wasser sowie der anschließenden Abkühlung der Rohlinge vor dem Härteprozess werden in die Simulation integriert. Die nachfolgenden Abschnitte zeigen hierfür ein geeignetes methodisches Vorgehen auf.

#### **3.2.1 Integration elektrischer Energieverbräuche anhand von Lastprofilen**

Elektrischer Strom wird bei der KS-Herstellung in allen Prozessschritten außer zur Reaktion des Gemischs und zur Autoklavierung benötigt. Um Einsparpotenziale durch ablauf- oder auslastungsbezogene Anpassungen mithilfe der DES zu ermitteln, ist es erforderlich, energieverbrauchsrelevante Einflussgrößen zu identifizieren, die Leistungsaufnahme anhand von Messungen zu quantifizieren und in das Modell zu integrieren. So kann die DES in KS-Werken beispielsweise dazu dienen,

- optimale Betriebsprofile für die Anlagen zu ermitteln (z. B. Abschalten bei ausreichend langen Wartezeiten anstelle des betriebsbereiten Zustands),
- Fertigungsaufträge auf parallelen, nicht-identischen Maschinen energieoptimiert einzulasten (z. B. Zuordnen von Steinsorten zu Pressen ohne Missverhältnis zwischen Leistungsfähigkeit und erforderlicher Leistung der Presse),

- Anlagen am optimalen Betriebspunkt zu betreiben (z. B. Ausrichtung der Chargengröße für den Mischer am optimalen Betriebspunkt, wenn der weitere Produktionsablauf davon unbeeinflusst bleibt).

Um energetische Auswirkungen von Ablaufänderungen detailgenau quantifizieren zu können, wird für die Simulation der elektrischen Energieverbräuche bei der KS-Herstellung auf eine betriebszustandsabhängige Energiesimulation auf Basis aufgezeichneter, feingranularer Leistungsverläufe nach KOHL [72] zurückgegriffen. Hierbei wird nach jedem Wechsel des Betriebszustands (BZ) einer Anlage der während des vorherigen BZ angefallene Energiebedarf errechnet, der sich aus zugeordneten Lastprofilen ergibt. Zur Umsetzung der Energiesimulation ist die in Bild 41 aufgeführte Vorgehensweise zu verfolgen, die im Folgenden weiter erläutert wird.

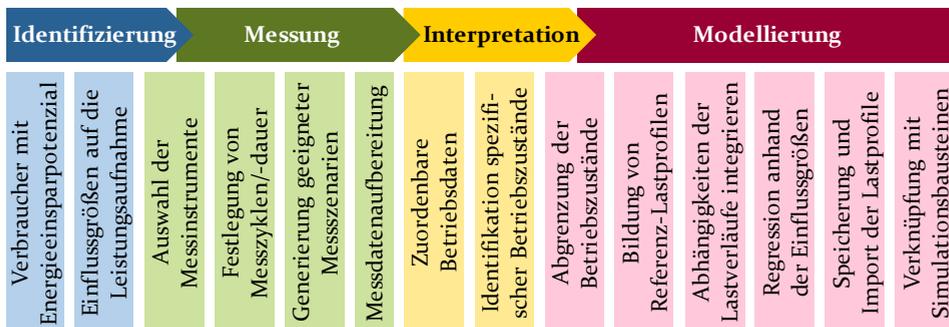


Bild 41: Methodik zur Integration elektrischer Energieverbräuche in DES

Zu Beginn sind Verbraucher zu *identifizieren*, die Potenzial für maßgebliche Einsparungen elektrischer Energie durch Ablauf- oder Auslastungsanpassungen aufweisen. Als Anhaltspunkte hierfür können der Gesamtenergieverbrauch pro Zeiteinheit oder die maximale Leistungsaufnahme im Betrieb gesehen werden. Ebenso stellen nicht vollausgelastete Aggregate häufig einen Ansatzpunkt zur Realisierung von Energieeinsparungen dar. Für die KS-Herstellung wurden relevante Verbraucher aus Messungen im Rahmen von Fallstudien hergeleitet. Sie sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Um variierende Leistungsaufnahmen innerhalb desselben Prozesses in der Simulation berücksichtigen zu können, sind zusätzlich die Einflussgrößen für diese Varianz des Lastprofils zu identifizieren. Diese können varianten- oder prozessabhängig sein. Als einwirkende Parameter kommen hier häufig das Gewicht oder die Bearbeitungsgeschwindigkeit in Betracht. Alle Einflussgrößen sind ebenso in Tabelle 9 den einzelnen Aggregaten zugeordnet.

Tabelle 9: Aggregatbezogenes Vorgehen zur Konfiguration der Energiesimulation

Bereich	Verbraucher	Relevante Einflussgrößen auf Leistungsaufnahme	Messzyklen/-dauer	Messszenarien (zusätzlich zu allen BZ)	Spezifische Betriebszustände	Lastprofilanpassung (BZ, arbeitend)
Rohstoffe	Steigband	Gewicht Geschwindigkeit	30 Transporte mit demselben Material	unterschiedliche Rohstoffe und Geschwindigkeiten	<b>wartend</b> = Leerlauf (Band mit Grundlast aktiv) <b>hoch-/abfahrend</b> = Übergang zwischen Leerlauf und voller Beladung kein <b>rüstend</b>	iterieren
Mischerei	Mischer	Volumen Dichte Wirblereinsatz	30 Zyklen mit derselben Chargen- größe und -rezept	unterschiedliche Chargen mit/ohne Wirbler	<b>wartend</b> = Leerlauf (Grundlast) <b>hochfahrend</b> = Befüllung <b>abfahrend</b> = Entleerung kein <b>rüstend</b>	strecken/ komprimieren
	Wirbler	Volumen Dichte	s. Mischer	unterschiedliche Chargen	kein <b>hoch-/abfahrend, rüstend</b>	strecken/ komprimieren
	Förderbänder	Gewicht Geschwindigkeit	s. Steigband	unterschiedliche Chargen und Geschwindigkeiten	<b>wartend</b> = Leerlauf (Grundlast) <b>hochfahrend</b> = Übergang (Leerlauf↔volbeladen) <b>abfahrend</b> = nur Übergang (vollbel.⇒Leerlauf) kein <b>rüstend</b> Anfahrmoment nach <b>pausiert</b>	iterieren
Reaktoren	Reaktorabzug	Umlaufgeschwindigkeit der Zahnräder	30 Zyklen mit demselben Material	unterschiedliche Geschwindigkeiten	<b>hochfahrend</b> = Anfahrmomente kein <b>rüstend</b>	iterieren
	Nachmischer	Volumen Dichte	30 Zyklen mit demselben Material	unterschiedliche Chargen	s. Förderbänder (Mischerei)	strecken/ komprimieren
	Förderbänder	s. Mischerei	s. Mischerei	s. Mischerei	s. Mischerei	s. Mischerei
Pressen	Ober-/ Unterstempel	Steinformat Rohdichte	30 Zyklen desselben Steinformats	unterschiedliche Gemische und Steinformate	<b>wartend</b> = iterierendes Nachpumpen von Hydrauliköl zum Halten der Stempelposition	str./kompr.; bei wartend: iterieren
	Stempelheizung	---	60 min	Übergang zwischen rüstend und arbeitend	<b>rüstend</b> = Aufheizen der Stempelheizung am Ende des Rüstvorgangs <b>arbeitend</b> = Halten der Temperatur <b>wartend</b> = <b>blockiert</b> = <b>gestört</b> kein <b>hoch-/abfahrend, pausiert</b>	iterieren
	Portalkran/ Greifer	Gewicht, Geschwindigkeit	30 Zyklen derselben KS-Sorte	unterschiedliche Steingewichte, Geschwindigkeiten	<b>wartend</b> = Grundlast für Hydraulik kein <b>rüstend</b>	str./kompr.; bei wartend: iterieren
	Förderband	s. Mischerei	s. Mischerei	s. Mischerei	s. Mischerei	s. Mischerei
Autoklaven	Schiebebühne	Gewicht Geschwindigkeit	240 min	unterschiedliche Gewichte, Geschwindigkeiten, Leerfahrten und Be-/ Entladevorgänge	<b>arbeitend</b> = verschiedene Simulationsbausteine für Be- und Entladen der Schiebebühne erforderlich kein <b>rüstend</b>	strecken/ komprimieren
Verpackung	Portalkrane	s. Pressen	s. Pressen	s. Pressen	s. Pressen	s. Pressen
	Plattenband/ Kettenförderer	s. Portalkran	s. Portalkran	s. Portalkran	nur <b>arbeitend</b> und <b>aus</b> erforderlich	strecken/ komprimieren
	Verpackungsmaschinen	Dimensionen	30 Zyklen desselben Steinpakets	Unterschiedliche Paketgrößen	kein <b>hoch-/abfahrend, pausiert</b>	strecken/ komprimieren

Nach erfolgter Abgrenzung des Untersuchungsspektrums ist ein individuelles *Messprogramm* für alle zu untersuchenden Verbraucher zu erstellen. Hierbei sind folgende Elemente einzubeziehen:

- **Messinstrument:** Das Messmittel muss in der Lage sein, die Leistungsaufnahme der Anlagen präzise (geringer Messfehler) und feingranular (ausreichend kleines Abtastungsintervall) aufzunehmen, so dass auch bei iterativer Verwendung des hervorgehenden Lastprofils in der Simulation nur kleine Abweichungen von realen Energiever-

bräuchen auftreten. Zudem sind die Messwerte für die Weiterverarbeitung zu speichern und über Schnittstellen bereitzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf den Enclosure-Messkoffer aus [72] zurückgegriffen.

- **Messzyklen/-dauer:** Um Schwankungen in der Messung einzelner Prozesszyklen auszugleichen, sind Prozesse über einen hinreichend langen Zeitraum hinweg zu bemessen, um daraus ein signifikantes Referenzlastprofil ableiten zu können. Werden Verbraucher zyklisch verwendet (z. B. Mischer chargenweise, Pressenober-/unterstempel hubweise), so ist eine ausreichende Anzahl an wiederkehrenden Prozesszyklen heranzuziehen. Die erforderliche Anzahl an Stichproben ist abhängig von Faktoren wie der Varianz der Messwerte, dem erwünschten Signifikanzniveau sowie der erforderlichen Genauigkeit des zu ermittelnden Mittelwerts. Für die Bestimmung der Mindestanzahl sei auf [283] verwiesen. Liegt bei Prozessen eine periodische oder konstante Leistungsaufnahme vor, so sind sie über eine bestimmte Zeitdauer zu bemessen. Auch hierbei sind mehrere Messzeitpunkte zu wählen, um den Stichprobenfehler zu minimieren.
- **Messszenarien:** Die angegebenen Messzyklen sind für jeden Verbraucher für eine repräsentative Anzahl an Einstellungen der Einflussgrößen vorzunehmen. Bei gewichtsabhängigen Leistungsaufnahmen sind beispielsweise Varianten heranzuziehen, die sich über das gesamte Gewichtsspektrum des Prozesses verteilen. Es ist darauf zu achten, dass alle BZ (s. Tabelle 10) einbezogen werden. Es muss nicht das gesamte Variantenportfolio abgedeckt sein, da die Lastprofile mittels Regression angenähert werden können. Für die Ermittlung geeigneter Versuchsläufe kann die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) herangezogen werden (s. hierzu [284]).
- **Messdatenaufbereitung:** Zur weiteren Analyse der Lastprofile ist eine Aufbereitung der erfassten Daten erforderlich. Teils sind die Leistungswerte aus den Wirkleistungen der einzelnen Phasen zu aggregieren. Darüber hinaus sollten diese Werte über eine Zeitachse in einem Diagramm aufgetragen werden, um weitere Analysen (z. B. Abgrenzung von Zyklen oder BZ) vorzunehmen.

Im nächsten Schritt sind den jeweiligen Prozessen Betriebsdaten zuzuordnen, um die erhaltenen Lastprofile zu *interpretieren*. Diese Daten sollten sich insbesondere auf die Wechselzeitpunkte der BZ sowie die identifizierten Einflussfaktoren auf die Leistungsaufnahme beziehen. Bei der Auswertung der Lastprofilidiagramme treten gegebenenfalls weitere signifikante

Muster hervor, die sich auf spezifische Betriebszustände des Aggregats zurückführen lassen. Diese sind in der Modellierung entsprechend zu berücksichtigen.

Tabelle 10: Eigenschaften der zu den Lastprofilen zuzuordnenden Betriebszustände

Betriebszustand	Beschreibung	Profilart	varianten-abhängig	prozess-parameter-abhängig
<b>arbeitend</b>	Produkt wird aktuell bearbeitet/transportiert	terminiert	ja	ja
<b>wartend</b>	Maschine wartet auf Betriebsmittel vom Vorgänger			
<b>blockiert</b>	Maschine kann bearbeitetes/transportiertes Gut nicht an Nachfolger weitergeben	periodisch	nein	ja
<b>gestört</b>	Reparatur erforderlich, keine Bearbeitung/Transport möglich			
<b>hochfahrend</b>	Übergang in Betriebszustand mit höherer Leistungsaufnahme	terminiert	ja	ja
<b>abfahrend</b>	Übergang in Betriebszustand mit niedrigerer Leistungsaufnahme			
<b>pausierend</b>	Energiesparender Zustand	periodisch	nein	nein
<b>rüstend</b>	Maschine wird umgerüstet	terminiert	ja	ja
<b>aus</b>	Abgeschaltete Maschine; Peripherie kann weiterhin betriebsbereit sein	periodisch	nein	nein

Als Übergang von der Interpretation der Daten zur *Modellierung* der Simulation sind die Betriebszustände aus Tabelle 10 in den Lastprofilen abzugrenzen und als separate Lastprofile zu hinterlegen. Insbesondere für den BZ „gestört“ wird vereinfachend eine Variantenabhängigkeit ausgeschlossen, da dieses Lastprofil ohnehin approximiert werden muss, nachdem keine Möglichkeit besteht, Leistungsaufnahmen für alle potenziellen Störungen durchzuführen. Durch Mittelwertbildung aus den einzelnen Messzyklen ergeben sich Referenzlastprofile, die Schwankungen im Messverlauf ausgleichen und als Berechnungsbasis in die Simulation einbezogen werden.

Trotz spezifischer Lastprofile für alle BZ decken diese sämtliche auftretende Lastverläufe noch nicht vollständig ab. So müssen variantenabhängige Unterschiede in der DES mittels Regression über festgelegte, erklärende Variablen kompensiert werden. Verursachen zeitliche Prozessparameter, die aufgrund ihres kontinuierlichen Charakters nicht alle explizit erfasst worden sind, Varianz in den Lastverläufen, so eröffnen sich gemäß Bild 42 die Optionen, die Profile auf die jeweilige Zykluszeit hin

- zu komprimieren,
- zu strecken oder
- zu iterieren (vornehmlich bei periodischen Profilen).

3 Effiziente Simulationsmodelle als operatives Werkzeug zur Identifikation und Bewertung von Verbesserungspotenzialen

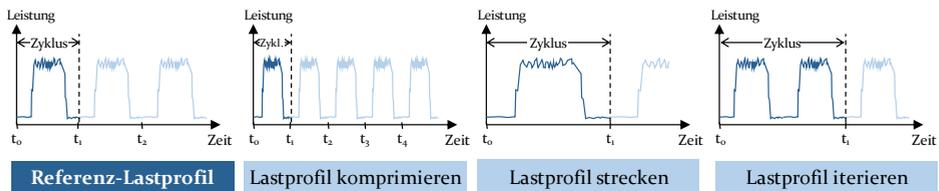


Bild 42: Anpassung von Lastprofilen bei variierenden zeitbezogenen Prozessparametern

Zur Integration der Lastprofile in die DES sind diese unter Angabe eines Zeitstempels sowie der zugeordneten Leistungsaufnahme strukturiert abzulegen. Die Struktur ergibt sich aus der Aufgliederung in die Bereiche, welche wiederum durch die einzelnen Verbraucher unterteilt sind. Hierin sind alle zugeordneten Referenzlastprofile einzeln für jeden BZ sowie die zugehörigen Regressionsformeln für variantenabhängige Lastprofilanpassungen enthalten.

Im DES-Modell erfolgt die Integration über das im Rahmen der Forschungsarbeiten von KOHL [72] entwickelte Energiemodul, das um die Verwendung der Regressionsformeln bei Variantenabhängigkeit sowie die Lastprofilanpassung nach Bild 42 ergänzt ist. Die Energieverbräuche errechnen sich über die importierten Lastprofile in Verbindung mit hinterlegten Funktionen, die – wie in Bild 43 skizziert – den Simulationsbausteinen zugeordnet sind und bei Veränderung des Betriebszustands aufgerufen werden. Über Informationen zu den bearbeiteten oder transportierten Varianten, die als Attribute in den beweglichen Elementen mitgeführt werden, können die spezifischen, variantenabhängigen Lastprofile aufgerufen werden.

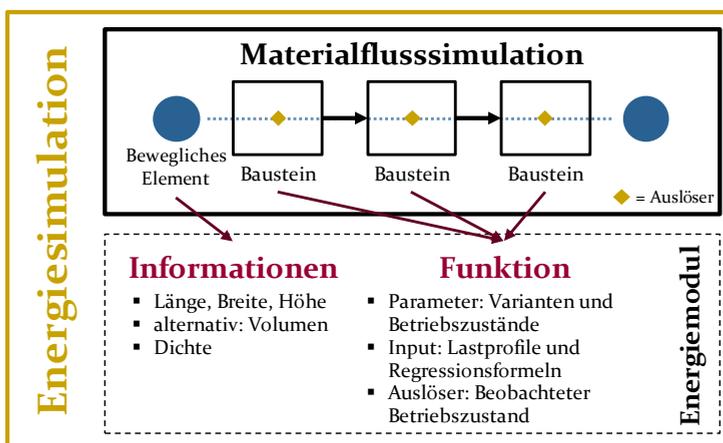


Bild 43: Implementierung der Berechnungsfunktionalität für variantenabhängige, elektrische Energieverbräuche in einem DES-Modell

### 3.2.2 Modellierung des thermischen Verhaltens der Werkstoffe vor dem Härteprozess

Nicht nur zur Identifizierung von Energieeinsparpotenzialen, sondern auch für eine präzise Modellierung der Materialflüsse in der DES empfiehlt sich die Integration des thermischen Verhaltens des prozessierten Materials und Stückguts. Bei der KS-Herstellung hängt zum einen die Energieeinbringung im Härteprozess vom thermischen Zustand der enthaltenen Rohstoffe ab (s. a. Bild 39). Zum anderen resultiert daraus aufgrund des Einflusses auf die Dampfüberleitung auch die Dauer der Autoklavierung.

Für die Integration des thermischen Zustands des KS-Materials im DES-Modell ist die Betrachtung des in Bild 44 hervorgehobenen Bereichs des Herstellungsprozesses ausreichend. Beim ersten Prozessschritt, dem Mischvorgang, wird durch das Zusammenbringen von Branntkalk und Wasser Reaktionswärme freigesetzt (s. Formel (2.1), Seite 10), die zu einem Großteil in das Sandgemisch übergeht und dort zu einer Temperaturerhöhung führt. Diese Wärmeenergie ist zu einem möglichst großen Anteil bis zum Start des Härtevorgangs zu erhalten, um in diesem späteren Prozess die zwischenzeitlich abgegebene Energie nicht erneut zuführen zu müssen. Ein schematischer Temperaturverlauf zwischen der Rohstoffbereitstellung und dem Übergang zu den Autoklaven ist exemplarisch in Bild 44 skizziert. Im Rahmen einer Fallstudie des Autors [P11] trat ein Temperaturabfall von 67,8 °C auf 42,3 °C auf.

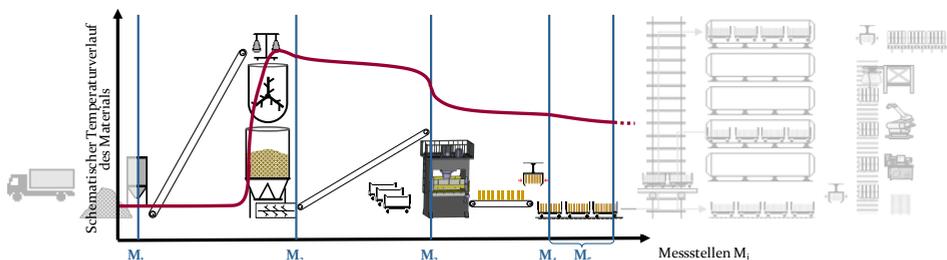


Bild 44: Betrachtungsbereich für die Integration des thermischen Verhaltens der Materialflüsselemente in der DES

Zur Erreichung von Energieeinsparungen, können Anpassungen im Layout oder in den Transportprozessen vorgenommen werden, um eine verringerte Wärmeabgabe an die Umgebung herbeizuführen. Hierzu muss bekannt sein, an welchen Stellen ein vergleichsweise hoher Temperaturabfall pro Zeit eintritt. Darüber hinaus können Eingriffe in den Produktionsablauf dazu dienen, Prozessschritte, in denen das Material eine vergleichs-

weise große Kontaktfläche zu einer Umgebung mit hoher Temperaturdifferenz (z. B. Raumluft, Härtewagen) aufweist, möglichst stark zu verkürzen. So lässt sich die Wärmeübertragung eindämmen. Zur Ermittlung der Auswirkungen solcher organisatorischen Maßnahmen eignet sich die Simulation in besonderem Maße.

Zur Komplexitätsreduktion wird für die Quantifizierung der Abkühlung aufgrund dessen hinreichender Genauigkeit für den Einsatz in der Simulation anstelle der Integration von multiplen Differentialgleichungen in der DES auf das Newton'sche Abkühlungsgesetz (Formel (3.2)) zurückgegriffen. Anhand verschiedener Messstellen, die in Bild 44 durch  $M_i$  gekennzeichnet sind, werden einzelne Produktionsbereiche eingegrenzt und hierfür über den Herstellprozess verteilte Abkühlungsraten  $\alpha$  experimentell bestimmt. Die errechnete Materialtemperatur beim Verlassen des vorangegangenen Produktionsbereichs gilt in den Simulationsberechnungen stets als Ausgangstemperatur  $T_0$  des nachfolgenden Bereichs. So lassen sich die Temperaturen des Materials für beliebige Aufenthaltszeiten im Produktionsbereich berechnen.

$$T(t) = (T_0 - T_U) \cdot e^{-\alpha t} + T_U \quad (3.2)$$

mit

$\alpha \hat{=}$  Abkühlungsrate

$T(t) \hat{=}$  Materialtemperatur (zeitabhängig)

$T_0 \hat{=}$  Ausgangstemperatur Material

$T_U \hat{=}$  Umgebungstemperatur

Temperaturverläufe von Aufheizprozessen können hingegen mithilfe eines Polynoms zweiten Grades geeignet angenähert werden [P10]. Demnach ist die Temperaturentwicklung nach dem Vermengen der Rohstoffe bis zum vollständigen Abschluss der exothermen Reaktion kontinuierlich zu messen, um anschließend den gemessenen Temperaturverlauf mithilfe einer quadratischen Regression zu formalisieren. Erst nach dem Zeitpunkt des vollständigen Abreagierens ist das Abkühlen des Materials für die Berechnung des Abkühlungsfaktors bis Messstelle  $M_2$  anzusetzen.

Um die Temperaturentwicklung über den Produktionsverlauf mithilfe der DES bestimmen zu können, kann die Methodik aus Bild 45 angewandt werden. Zur Festlegung der Abkühlungsraten ist die Temperaturentwicklung des Materials im Zeit- und Prozessverlauf sowie die jeweilige Umgebungstemperatur zu messen. Da die Wärmeübertragung an die Umgebung neben dem Zeitfaktor stark von der Materialoberfläche, die dem umgebenden Luftstrom ausgesetzt ist, abhängt, sind als Messpunkte Orte zu wählen, in

deren Nähe sich die Materialoberfläche pro Masseneinheit bei hinreichend großem Temperaturunterschied zur Umgebung maßgeblich ändert. Dies ist zum Beispiel an Übergängen zwischen Lagerungs-/Bearbeitungs- und Transportprozessen der Fall.

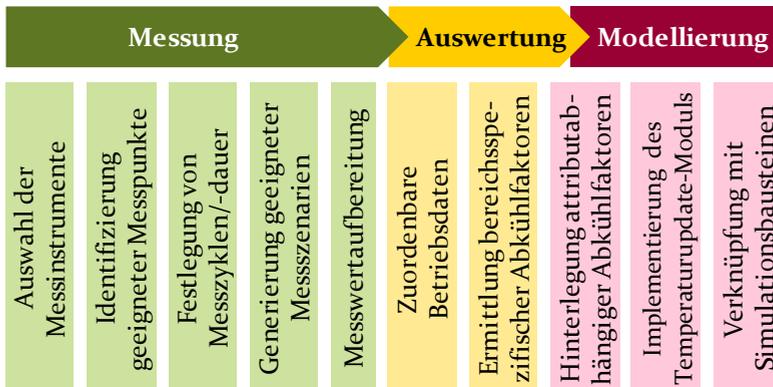


Bild 45: Vorgehensweise zur Integration des thermischen Verhaltens von Materialflusselementen in der Simulation von KS-Werken

Zudem sollten die Messstellen jeden Bereich umgrenzen, der aufgrund veränderbarer Prozesseinstellungen eine Variation der Durchlaufzeit hervorruft und so maßgeblichen Einfluss auf den Wärmeverlust nehmen kann. Daher werden gemäß Bild 44 folgende Messstellen für die KS-Herstellung festgelegt:

- M<sub>1</sub>:** Ausgang Rohstoffsilo<sup>7</sup>
- M<sub>2</sub>:** Ausgang Reaktor bzw. Nachmischer (sofern direkt gekoppelt)
- M<sub>3</sub>:** Eintritt in den Pressenpuffer
- M<sub>4</sub>:** Beladung des Härtewagens nach der Presse
- M<sub>5</sub>:** Pufferbereich für beladene Härtewagen<sup>8</sup>

Aufgrund der starren Verkettung der Produktionsanlagen sind in der Anwendung die Messstellen unter Berücksichtigung der Zugänglichkeit zu wählen. Als Messinstrumente erwiesen sich in Fallstudien für Schüttgut bereits einfache Tauchfühler und für Stückgut Oberflächenfühler oder alternativ für beide berührungslose Sensoren als tauglich. Analog zu Abschnitt 3.2.1 sind für die Aufnahme der Temperaturverläufe zwischen den

<sup>7</sup> Da die Rohstoffe in etwa dieselbe Temperatur wie die Umgebungsluft aufweisen, können die Messungen auch erst bei den Waagen erfolgen.

<sup>8</sup> Aufgrund des längeren Aufenthalts und der durchgängigen Zugänglichkeit können hier mehrere Messwerte verteilt aufgenommen werden.

einzelnen Messbereichen ein ausreichend großer Stichprobenumfang anzusetzen, wobei diskrete Messzeitpunkte ausreichend sind. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Werte über das gesamte Intervall möglicher Aufenthaltsdauern des Gemischs in diesem Produktionsbereich verteilt liegen und auch die resultierende Temperatur des vorangegangenen Messbereichs bekannt ist. An der Messstelle  $M_5$  gestaltet sich dies beispielsweise einfach, da die Rohlinge über einen langen Zeitraum zugänglich sind. Zur differenzierteren Bestimmung der Abkühlung sind die Untersuchungen zusätzlich für unterschiedliche Gemische und bei verschiedenen Außentemperaturen durchzuführen. Hierdurch können die Umgebungstemperaturen  $T_U$  in der Simulation mittels Regression aus der Außentemperatur abgeleitet werden.

Bei der *Ergebnisauswertung* ist darauf zu achten, die aufgenommenen Werte so in Verbindung zu bringen, dass sich der Temperaturverlauf des Materials über den gesamten Betrachtungsbereich verfolgen lässt, um Ausgangs- und Endtemperaturen verknüpfen und so die Abkühlungsrate errechnen zu können. Um den Verlauf des Materials durch das Produktionssystem nachzuvollziehen, sind zuordenbare Betriebsdaten einzubeziehen. Hierbei handelt es sich insbesondere um Mischaufräge und Presszyklen sowie um ausgelöste Transportaufträge mit entsprechenden Transportmengen.

Auf Basis der verknüpften Messwerte mit zugeordneten Zeitpunkten (Ausgangstemperatur  $T_0$  an Messstelle  $M_i$  und Materialtemperatur  $T(t)$  bei  $M_{i+1}$  zum Zeitpunkt  $t$ ) und der jeweiligen Umgebungstemperatur  $T_U$  lässt sich mithilfe von Formel (3.2) für das Newton'sche Abkühlungsgesetz die Abkühlungsrate  $\alpha$  für den betrachteten Messbereich berechnen. Nach Durchführung dieser Berechnung für alle Messzyklen ergibt sich durch Mittelwertbildung die durchschnittliche Abkühlungsrate für den betrachteten Bereich zwischen zwei Messstellen (für die gegebene Rohdichte des Gemischs).

Für die *Modellierung* der Temperaturverläufe in einer DES, die in Bild 46 skizziert ist, sind diese errechneten Abkühlfaktoren je für die einzelnen Messbereiche und Rohmischungen abzulegen. Als Ausgangstemperatur des Gemischs vor der Reaktion ist die Summe der Rohstofftemperaturen unter Berücksichtigung von deren Masseanteilen anzusetzen. Tritt ein bewegliches Element in einen Baustein ein und liegt an dieser Stelle ein Übergang zwischen zwei Messbereichen vor, so wird ein neuer Temperaturwert für das Material errechnet. Hierzu bezieht das Energiemodul aus dem pro-

zessierten Material Informationen über dessen Temperatur zum vorherigen Bestimmungszeitpunkt, ebendiesen Zeitpunkt und die Rohdichte. Aus der Außentemperatur (Angabe des Bedieners) errechnet das Modell mittels Regressionsfunktion für diese Temperatur die im jeweiligen Bereich vorliegende Umgebungstemperatur. Auf Basis der Rohdichte des Gemischs kann die dem Baustein zugeordnete Abkühlungsrate aus der hinterlegten Tabelle bezogen werden. Durch Einsetzen in Formel (3.2) ergibt sich der neue Temperaturwert für das Material, der in diesem Element mit Zeitstempel als Attribut gespeichert wird.

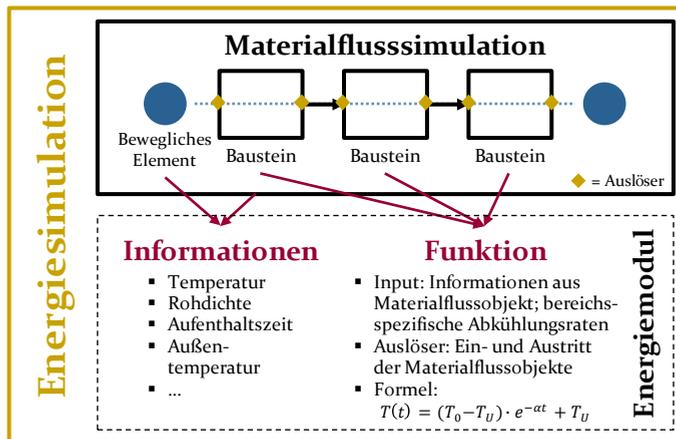


Bild 46: Implementierung der Berechnungsfunktionalität für thermische Energieflüsse in den Materialflusselementen vor dem Härteprozess im DES-Modell

### 3.3 Physikalische Modellierung der thermodynamischen Wechselwirkungen beim Härteprozess

Für einen präzisen Einbezug der thermodynamischen Wechselwirkungen im Härteprozess in der DES wird eine gesonderte Methodik für deren Abbildung entwickelt. Zur anwendungsgerechten Integration der prozessualen Abhängigkeiten zwischen mehreren aktiven Härtekesseln in einem Dampfsystem (vgl. Bild 7, Seite 14) wird der Gesamtprozess in einzelne Phasen unterteilt. Die energetischen Entwicklungen innerhalb der Phasen werden anschließend anhand von Energiebilanzen zwischen den beteiligten Komponenten formalisiert, sodass hieraus die gesamte erforderliche Härtezeit für Rohlinge in einem AK in einem ereignisdiskreten Modell errechnet werden kann. Auf dieser Basis wird der Fortlauf der Simulation gesteuert.

### 3.3.1 Grundlegende thermodynamische Zusammenhänge im Härteprozess

Gemäß Abschnitt 3.1.4 wird die Bearbeitungszeit für die Autoklavierung von vielfältigen Einflussfaktoren mitbestimmt (s. Bild 39). Einige dieser Faktoren sind nicht a priori für einen Simulationslauf determiniert, sondern ergeben sich auch in der Realität dynamisch, da sie vom Zustand und Verhalten des gesamten Produktionssystems abhängen. Da viele dieser Faktoren thermodynamischen Wechselwirkungen ausgesetzt sind, müssen diese Interdependenzen in das Modell einbezogen werden, um die tatsächliche Bearbeitungszeit im Simulationsmodell möglichst präzise approximieren zu können.

Auf eine Verwendung numerischer Lösungsverfahren für Differentialgleichungssysteme oder eine Kombination mit kontinuierlichen Simulationsprogrammen (z. B. ANSYS Multiphysics) wird verzichtet, um die Simulationslaufzeit gering zu halten (vgl. Anforderung A2), eine komplexe Modellerstellung zu vermeiden und auf keine zusätzlichen Programme angewiesen zu sein. Stattdessen werden für die Modellierung des Härteprozesses alle Vorgänge als stationär angenommen und die Bearbeitungszeit auf dieser Basis analytisch errechnet. Zudem ermitteln alle nachfolgenden Berechnungsformeln unter Berücksichtigung von Phasenübergängen die Zeitpunkte, zu denen sich ein thermisches Gleichgewicht im AK(-Paar) mit all seinen Komponenten (s. Bild 47) einstellt. Die entsprechende Vorgehensweise, die auf den Daten und Voruntersuchungen aus [18] aufbaut, wird im Folgenden aufgezeigt.

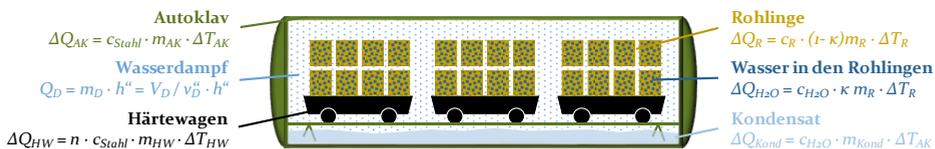


Bild 47: Komponenten eines Autoklavs im Härteprozess i. A. a. [18]<sup>9</sup>

Zur fortwährenden Berechnung des Temperatur- und Druckverlaufs der AK im DES-Modell wird der Härtevorgang in einzelne Phasen zerlegt. Bild 48 skizziert die zugehörigen Trennstellen in einer realen Härtekurve. Dieser liegt eine Soll-Härtekurve zugrunde, die sich durch Wartezeiten und Überleitvorgänge ausdehnt. Auch im Modell geht diese durch die vorgenommenen Berechnungen in eine realitätsnahe Härtekurve über.

<sup>9</sup> zugehörige Variablendefinition in Tabelle 11

### 3.3 Physikalische Modellierung der thermodynamischen Wechselwirkungen beim Härteprozess

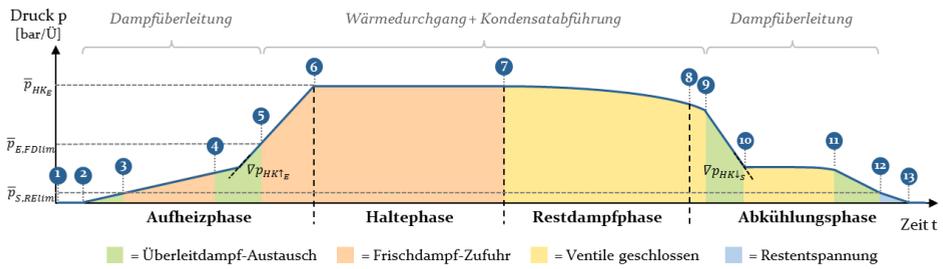


Bild 48: Unterteilung der Berechnungsmethodik für die Bearbeitungszeit in den Autoklaven in einzelne Berechnungsphasen

Zur Veranschaulichung wird bei der Charakterisierung der Trennstellen in Bild 49 ein modellbasierter Überleitvorgang zwischen je einem Empfänger- und zwei Spenderkesseln exemplarisch quantifiziert.

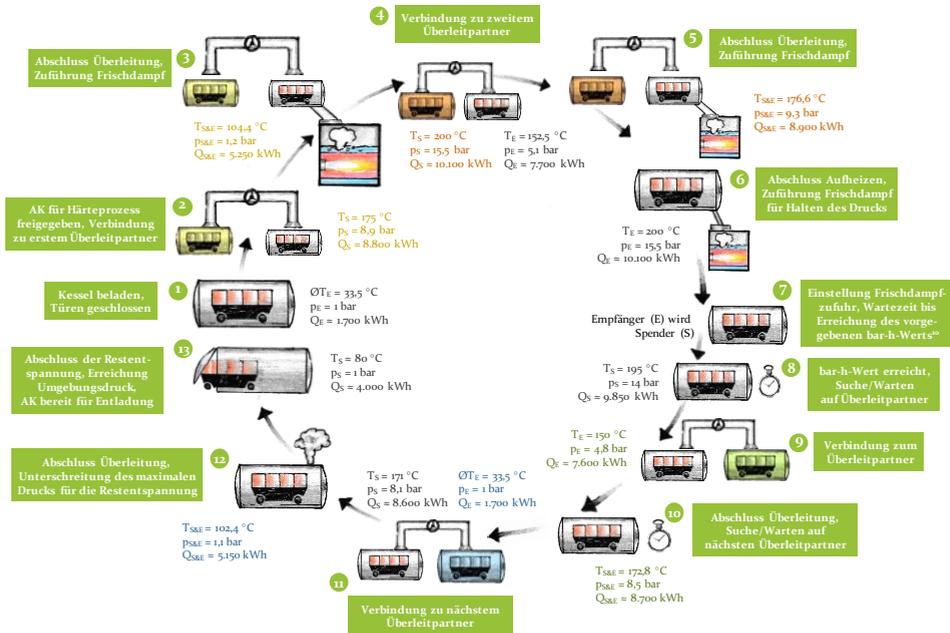


Bild 49: Charakterisierung der Trennstellen der Berechnungsmethodik für den Härteprozess anhand eines exemplarischen Härtevorgangs

<sup>10</sup> Der bar-h-Wert ist ein Vorgabeparameter für die Härtung von KS, der das Integral der Dampfkurve einer Soll-Härtekurve (s. Bild 6) von der Aufheizphase bis zum Ende der Restdampfphase wiedergibt. Nach Erreichen des vorgegebenen Werts ist unter normalen Umständen die erforderliche Steinqualität erreicht.

Für die Berechnungen wurde zur Vereinfachung die Annahme getroffen, dass nur zwischen den Trennstellen (5) und (9) Kondensat aus den AK abgeführt wird. In den restlichen Phasen wird ein geschlossenes System angenommen, in dem auch das gesamte Kondensat im Kessel verbleibt.

Die Steuerung des gesamten Dampfsystems in der Realität wird im Rahmen der nachfolgenden Beschreibung der einzelnen Phasen erläutert. Die in Bild 48 skizzierten Phasen dienen lediglich der Veranschaulichung der Berechnungsmethodik. Deren Länge und teils auch die Häufigkeit ihres Eintretens hängt von der Interaktion mit anderen Autoklaven innerhalb des Berechnungsmodells ab. Die Trennpunkte der Phasen sind für die in Bild 49 skizzierten eintretenden Ereignisse gesetzt. Als Input für die Energieberechnungen in Bild 49 wurden die in Tabelle 11 aufgeführten Werte herangezogen.

Tabelle 11: Datengrundlage für exemplarische, thermodynamische Berechnungen

	Rohlinge	Autoklaven/Wasserdampf	Härtewagen
Wärmemenge [kJ] (Formel) <sup>11</sup>	$\Delta Q_R = c_R \cdot (1 - \kappa) m_R \cdot \Delta T_R$ $\Delta Q_{H_2O} = c_{H_2O} \cdot \kappa \cdot m_R \cdot \Delta T_R$ mit $0 < \kappa < 1$	$\Delta Q_{AK} = c_{Stahl} \cdot m_{AK} \cdot \Delta T_{AK}$ $\Delta Q_D = m_D \cdot h''$	$\Delta Q_{HW} = n \cdot c_{Stahl} \cdot m_{HW} \cdot \Delta T_{HW}$
Spezifische Wärmekapazität / Enthalpie ( $h''$ )	$c_R = 1,0 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ $c_{H_2O} = 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K}$	$c_{Stahl} = 0,452 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ $h''_{200^\circ C} = 2792,5 \frac{kJ}{kg}$	$c_{Stahl} = 0,452 \frac{kJ}{kg \cdot K}$
Masse	$m_R = 118.800 \text{ kg}$	$m_{AK} = 50.000 \text{ kg}$	$m_{HW} = 930 \text{ kg}$
Mittlere Rohdichte	$\rho_R = 1,9 \text{ t/m}^3$	-	-
Volumen	$V_R = 62 \text{ m}^3$	$V_{AK} = 123 \text{ m}^3$	$V_{HW} = 0,3 \text{ m}^3$
Anzahl	-	-	$n = 8$
Initialtemperatur	$T_R = T_{H_2O} = 30^\circ C$	$T_{AK} = 60^\circ C$	$T_{HW} = 20^\circ C$
Wasseranteil	$\kappa = 8 \%$	-	-
Material	KS-Gemisch	Stahl	Stahl

Der Parameter  $\varnothing T$  in der Abbildung stellt die Durchschnittstemperatur<sup>12</sup> aller beteiligten Komponenten vor der Druckbeaufschlagung dar. Mit  $Q$  wird die in einem Autoklaven enthaltene Wärmemenge angegeben. Zur

<sup>11</sup> Da zunächst die enthaltene Wärmemenge in den Komponenten bestimmt werden soll, wurde zur Vereinfachung stets von einer Ausgangstemperatur  $T_o = 0^\circ C$  ausgegangen.

<sup>12</sup> Die Durchschnittstemperatur der Komponenten Autoklav (AK), Rohlinge (R), Härtewagen (HW) und Wasser (H<sub>2</sub>O) in den Rohlingen errechnet sich mithilfe der Richmannschen Mischungsregel:

$$\varnothing T = \frac{c_{AK} \cdot m_{AK} \cdot T_{AK} + c_R \cdot m_R \cdot T_R + c_{HW} \cdot m_{HW} \cdot T_{HW} + c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot T_{H_2O}}{c_{AK} \cdot m_{AK} + c_R \cdot m_R + c_{HW} \cdot m_{HW} + c_{H_2O} \cdot m_{H_2O}}$$

Vereinfachung der Nachvollziehbarkeit und Beispielrechnung wurden für alle Überleitvorgänge identisch beladene Autoklaven eingesetzt.

### 3.3.2 Temperatur- und Druckanstieg während der Aufheizphase

Die nachfolgenden Absätze erläutern für die einzelnen Phasen gesondert die Modellierung der thermodynamischen Wechselwirkungen beim Härteprozess in der DES. Ausgangspunkt ist ein Zeitpunkt, an dem der Autoklav im Betrachtungsfokus mit einer festgelegten KS-Sorte beladen wurde.

#### Phase (1)-(2): Vorbereitung und Initialisierung des Härteprozesses

Bei jedem Umlagern eines Härtewagens in einen AK wird geprüft, ob das maximale Fassungsvermögen erreicht ist. Ist dies der Fall, wird zunächst die erforderliche Zeit für das manuelle Schließen des Kessels und die Erteilung der Startfreigabe als Wartezeit  $t_{Vorb}$  angesetzt. Im Anschluss erfolgt gemäß der Ablauflogik in Bild 50 die Überprüfung, ob ein Spenderkessel für die Dampfüberleitung zur Verfügung steht.

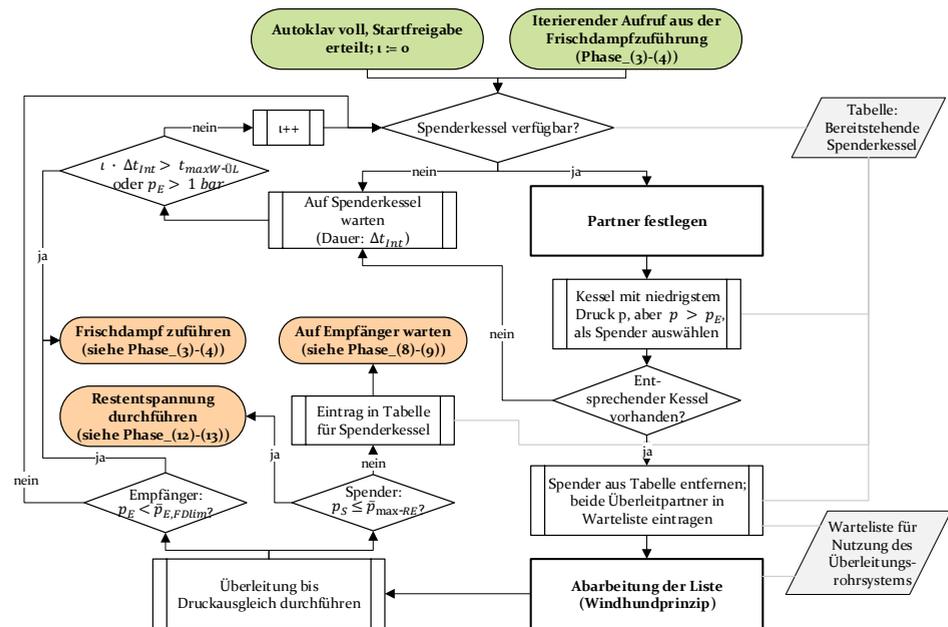


Bild 50: Logik zur Festlegung eines Überleitpaares als Flussdiagramm<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Die enthaltenen Variablen sind in den Beschreibungen der einzelnen Phasen definiert.

Ist dies nicht der Fall, kann direkt mit der Frischdampfzufuhr (Phase (3)-(4)) fortgefahren werden oder alternativ vorab eine weitere maximale Wartezeit  $t_{maxW-ÜL}$  angesetzt werden, in der iterierend (Inkrement  $\iota$ ; Iterationsintervall  $\Delta t_{Int}$ ) geprüft wird, ob ein Spenderkessel vorliegt. Wenn ein Spender gefunden ist, aber die Überleitung durch einen anderen Überleitvorgang belegt ist, ist eine zusätzliche Wartezeit  $t_{W-ÜL}$  anzusetzen. Die für Phase (1)-(2) erforderliche Zeit ergibt sich aus Formel (3.3).

$$t_{Phase(1)-(2)} = t_{Vorb} + t_{W-ÜL} + \sum_{k=0}^{\min(\lfloor \frac{t_{maxW-ÜL}}{\Delta t_{Int}} \rfloor; \iota)} k \cdot \Delta t_{Int} \quad (3.3)$$

### Phase (2)-(3): Dampfüberleitung (empfangender Autoklav)

Sind zwei Überleitpartner gefunden, so werden deren Ventile zum Überleitungsrohrsystem geöffnet und es strömt Dampf bis zum Druckausgleich (thermisches Gleichgewicht) vom Spender- in den Empfängeressel. Anhand der Höhe des Ausgleichsdrucks und des maximal gestatteten Druckabfalls  $\nabla p_{HK\downarrow_S}$  im Spender- bzw. Druckanstiegs  $\nabla p_{HK\uparrow_E}$  im Empfängeressel lässt sich die Dauer dieses Vorgangs berechnen. Maximaler Druckanstieg und -abfall sind vorgegebene Parameter aus den Härtekurven der beteiligten Autoklaven, die zur Vermeidung von Spannungsrissen in den Rohlingen dienen. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, dass der vorgegebene Gradient während des Überleitvorgangs konstant gehalten werden kann. Der Ausgleichsdruck hingegen ist unter Berücksichtigung verschiedener thermodynamischer Einflussfaktoren nach folgender Methodik zu errechnen:

Die im Empfängeressel enthaltene Wärmemenge errechnet sich durch Summierung der Wärmemengen der Komponenten Autoklav, Rohlinge, Wasser in den Rohlingen und Härtewagen (s. Tabelle 11). Für den Fall, dass der Kessel noch gegenüber der Atmosphäre geöffnet ist ( $p_E = 1 \text{ bar}$ ), gilt:

$$Q = c_R \cdot (1 - \kappa) m_R \cdot T_R + c_{H_2O} \cdot \kappa m_R \cdot T_R + c_{Stahl} \cdot (m_{AK} \cdot T_{AK} + n \cdot m_{HW} \cdot T_{HW}) \quad (3.4)$$

Für mit Druck beaufschlagte Kessel ( $p_{E,S} > 1 \text{ bar}$ ) gilt:

$$Q = T \cdot (c_R \cdot (1 - \kappa) m_R + c_{H_2O} \cdot \kappa m_R + c_{Stahl} \cdot (m_{AK} + n \cdot m_{HW})) + h''(T) \cdot m_D, \quad (3.5)$$

wobei  $T$  die für alle Komponenten identische Temperatur,  $h''(T)$  die temperaturabhängige, spezifische Enthalpie des gesättigten Wasserdampfes

darstellt und sich die Masse des Dampfes  $m_D$  mithilfe des temperaturabhängigen, spezifischen Dampfvolumens  $v_D''(T)$  aus Formel (3.6) errechnet:

$$m_D = (V_{AK} - V_R - V_{HW})/v_D''(T) \quad (3.6)$$

Unter der weiterhin geltenden Annahme eines vorliegenden thermischen Gleichgewichts lässt sich die Ausgleichstemperatur  $T_{S\&E}$  durch Zusammenfassen der in Spender- und Empfängerautoklav befindlichen Wärmemengen näherungsweise berechnen, indem der Zielwert schrittweise über Anpassung von  $h''(T_{S\&E})$  angenähert wird:

$$Q_{S+E} = Q_{Empfänger(E)} + Q_{Spender(S)} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow T_{S\&E} = Q_{S+E} / & \left( c_R \cdot \left( (1 - \kappa_S) m_{R,S} + (1 - \kappa_E) m_{R,E} \right) \right. \\ & + c_{H_2O} \cdot \left( \kappa_S m_{R,S} + \kappa_E m_{R,E} \right) \\ & + c_{Stahl} \cdot \left( m_{AK,S} + n_S \cdot m_{HW,S} + m_{AK,E} + n_E \cdot m_{HW,E} \right) \\ & \left. + m_D \cdot h''(T_{S\&E}) \right) \quad (3.8) \end{aligned}$$

Der sich daraus ableitende Kesselinnendruck bei  $T > 99,6^\circ\text{C}$  (andernfalls 1 bar Umgebungsdruck, da Ventile geöffnet sind) kann entweder durch Implementierung der exakten Formel für den Sättigungsdampfdruck nach [285], oder näherungsweise anhand der Magnus-Formel nach DIN 4108-3 [286] mit den Koeffizienten  $p(0^\circ\text{C}) = 610,5 \text{ Pa}$ ,  $C_1 = 17,269$  und  $C_2 = 237,3^\circ\text{C}$  bestimmt werden:

$$p_{S\&E}(T) = p(0^\circ\text{C}) \cdot e^{\frac{C_1 \cdot T}{C_2 + T}} \quad (3.9)$$

Dieser Druck stellt den Ausgleichsdruck bei der Dampfüberleitung dar. Die erforderliche Zeit zur Erreichung dieses Drucks leitet sich aus den Druckänderungsrestriktionen  $\nabla p_{HK\uparrow E}$  und  $\nabla p_{HK\downarrow S}$  der angesetzten Härtekurven für die beiden beteiligten AK ab:

$$t_{\text{Phase}(2)-(3)} = \max \left( \Delta p_E [\text{bar}] \cdot \frac{1}{\nabla p_{HK\uparrow E} [\text{bar}/h]}, \Delta p_S [\text{bar}] \cdot \frac{1}{\nabla p_{HK\downarrow S} [\text{bar}/h]} \right) \quad (3.10)$$

mit  $\Delta p_E = p_{S\&E}(T_{S\&E}) - p_E$  und  $\Delta p_S = p_S - p_{S\&E}(T_{S\&E})$

Hierbei ist zu beachten, dass sich die Steigungen beim Druckanstieg und -abfall im Zeitverlauf ändern können, wobei zur Vereinfachung nur stückweise lineare Härtekurven vorgesehen sind. Aus diesem Grund ist in festen Intervallen zu prüfen, ob sich in der Härtekurve eine Änderung des Gradienten beim bis dahin erreichten Druck eingestellt hat. Als geeignete Intervallgröße wird ein 30-sekündiger Abstand angesehen, da dies bei einem maximalen Druckanstieg von  $\nabla p_{HK\uparrow E} = 12 \text{ bar/h}$  einem Anstieg von 0,1 bar im vorgegebenen Intervall entspricht. Eine feinere Auflösung trägt in Anbetracht der getroffenen Annahmen nicht zu einer höheren Genauigkeit des Modells bei. Zur weiteren Präzisierung ist bei Vorliegen eines gegenüber der Atmosphäre geöffneten Überleitpartners ( $T < 99,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ) für diesen bei der Zeitberechnung anstelle des Umgebungsdrucks der mittels Formel (3.9) errechnete Druck als Ausgangsdruck anzusetzen. Andernfalls würde im Modell der erforderlichen Zeit für die Erwärmung der Komponenten über den übergelassenen Dampf nicht Rechnung getragen.

Zur Integration der Berechnungsmethodik im DES-Modell sind zunächst Informationen bezüglich der Temperaturen der am Härteprozess beteiligten Komponenten in den Objekten (Rohlinge, Härtewagen, Autoklaven) als Attribute mitzuführen. Deren aktuelle Temperatur kann mithilfe des Newton'schen Abkühlungsgesetzes (s. Formel (3.2)) durch Mitführung des Abkühlungsfaktors und der Ausgangstemperatur in den Objektattributen sowie durch Abruf der Umgebungstemperatur aus dem vorliegenden Produktionsbereich bestimmt werden (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die mittlere Temperatur der Härtewagen und Rohlinge lässt sich mithilfe der Richmannschen Mischungsregel (s. Fußnote 12, Seite 103) berechnen.

In einem im Autoklavennetzwerk hinterlegten, zentralen Steuerungsmodul für den Härteprozess wird eine Funktion zur Dampfüberleitung zwischen den beiden festgelegten AK aus Phase (1)-(2) aufgerufen. Nach Abruf der erforderlichen Attribute aus den beteiligten Komponenten ermittelt sie nach der oben angegebenen Methodik die Dauer der Dampfüberleitung, die in der Simulation als Wartezeit angesetzt wird. Nach deren Ablauf wird analog zu Phase (1)-(2) das weitere Vorgehen eingeleitet.

### **Phase (3)-(4): Frischdampfzufuhr**

Ist gegenwärtig kein Spenderkessel verfügbar und eine vorgegebene Wartezeit  $t_{\text{maxW-ÜL}}$  verstrichen, so wird die Frischdampfzufuhr gestartet. Ähnlich zum Vorgehen in Phase (2)-(3) steigt der Druck im Empfänger-AK durch Öffnung der Ventile zur Frischdampfleitung mit der Geschwindig-

keit  $\forall p_{HK\uparrow E}$ . Erneut wird in konstanten Abständen geprüft, ob zwischenzeitlich ein geeigneter Spenderkessel vorliegt, und gegebenenfalls direkt zu Phase (4)-(5) übergegangen. Andernfalls wird der Druck solange erhöht, bis beim  $\iota$ -ten Inkrementieren das Druckmaximum  $\bar{p}_{HK_E}$  erreicht ist (s. Phase (5)-(6)).

Hierfür ist im Steuerungsmodul für den Härteprozess eine Funktion hinterlegt, die in 30-sekündigen Abständen ( $\Delta t_{Int} = 30 \text{ s}$ ) den Druck erhöht und im zugeordneten Attribut überschreibt, um auf dieser Basis gemäß Bild 50 einen geeigneten Spenderkessel zu finden. Ist der maximale Druck erreicht, wird die Funktion zum Halten des Maximaldrucks (Phase (6)-(7)) aufgerufen. Die Dauer der Phase beträgt:

$$t_{Phase(3)-(4)} = t_{maxW-\ddot{U}L} + \iota \cdot \Delta t_{Int} \quad (3.11)$$

#### **Phase (4)-(5): Dampfüberleitung (empfangender Autoklav)**

Analog zu Phase (2)-(3) wird hier die erforderliche Zeit für die Überleitung ermittelt. In der Regel ist der empfangende Autoklav bereits gegenüber der Atmosphäre abgeschlossen und weist einen Druck  $p_E > 1 \text{ bar}$  auf. Je nach Zustand der Spenderkessel ist der zweite nicht notwendigerweise der letzte Überleitvorgang.

#### **Phase (5)-(6): Frischdampfzufuhr bis zum maximalen Härteindruck**

Ab Überschreiten einer vorgegebenen Druckgrenze  $\bar{p}_{E,FDlim}$  nach einem Überleitvorgang oder in Ermangelung eines geeigneten Spenderkessels (vgl. Phase (3)-(4)), wird bis zur Erreichung des maximalen Härteendrucks  $\bar{p}_{HK_E}$  Frischdampf zugeführt. Dies erfolgt analog zu Phase (3)-(4).

### **3.3.3 Druckregelung während der Halte- und Restdampfphase**

In gleicher Weise wie im vorangegangenen Abschnitt werden nun die Phasendauern während der Halte- und Restdampfphase hergeleitet.

#### **Phase (6)-(7): Halten des maximalen Drucks**

Mit dem Erreichen des maximalen Drucks  $\bar{p}_{HK_E}$  wird die Frischdampfzufuhr so geregelt, dass sie nicht mehr zu einem Druckanstieg, sondern zum Erhalt des vorliegenden Drucks gereicht. Sie kompensiert also die Wärmeabgabe an die Umgebung, die neben Undichtigkeiten maßgeblich im Wär-

medurchgang und in der Kondensatabführung begründet ist. Diese Faktoren nehmen zwar keinen Einfluss auf die Härtedauer, sollen jedoch simulativ aufgezeichnet werden, um Energieeinsparpotenziale quantitativ bewerten zu können.

Die Prozesszeit für diese Phase  $t_{Phase(6)-(7)}$  lässt sich ohne Berücksichtigung der energetischen Einflussfaktoren berechnen. Die bis zur Trennstelle (6) aufgewendete Prozesszeit ist in einer Attributtabelle im Autoklavenobjekt zusammen mit dem Druckanstieg festzuhalten. Diese Aufzeichnung erfolgt bei jeder Änderung des Druckanstiegs  $(\nabla p_i)_{i \in \mathbb{N}}$ . Aus diesen Informationen lässt sich mit der Formel

$$\Lambda_{Aufheiz,E} = \sum_{i \in \mathbb{N}} \frac{1}{2} \cdot (t_{\nabla p_i} - t_{\nabla p_{i-1}}) \cdot \left( (p_E(t_{\nabla p_i}) - 1) + (p_E(t_{\nabla p_{i-1}}) - 1) \right), \quad (3.12)$$

mit  $t_{\nabla p_0} = 0$  und  $p_E(t_{\nabla p_i}) \hat{=}$  Druck zum Zeitpunkt der  $i$ -ten Druckanstiegsänderung

der bislang erreichte *bar-h-Wert*  $\Lambda_{Aufheiz,E}$  bestimmen, der stets auf dem Überdruck (bar/Ü) über dem Umgebungsdruck basiert. Aus der Vorgabe  $\hat{\Lambda}_{Halte,HK_E}$  für die Härtekurve  $HK_E$ , welcher gesamte *bar-h-Wert* am Ende der Haltephase vorliegen soll, kann der noch erforderliche *bar-h-Wert* für die Haltephase  $\Delta\Lambda_{Halte,E}$  ermittelt werden:

$$\Delta\Lambda_{Halte,E} = \hat{\Lambda}_{Halte,HK_E} - \Lambda_{Aufheiz,E} \quad (3.13)$$

Nun lässt sich die verbleibende Haltezeit bestimmen durch

$$t_{Phase(6)-(7)} = \max\left(0, \frac{\Delta\Lambda_{Halte,E}}{\bar{p}_{HK_E}}\right) \quad (3.14)$$

Mit diesem Zeitwert als eingehender Faktor  $t$  in die Näherungsformel

$$Q_{ex}(t) = k \cdot A \cdot t \cdot \Delta T \quad (3.15)$$

mit

$k \hat{=}$  Wärmedurchgangskoeffizient  $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$

$A = 2 \cdot \pi \cdot r_{AK} \cdot l_{AK} + 2 \cdot \pi \cdot r_{AK}^2$   
 $\hat{=}$  Außenfläche der Autoklavenwand  $[m^2]$

$r_{AK} \hat{=}$  Außenradius des Autoklavs  $[m]$

$l_{AK} \hat{=}$  Länge des Autoklavs  $[m]$

$\Delta T = T_{AK} - T_U \hat{=}$  Temperaturdifferenz gegenüber der Umgebung  $[K]$

$T_U \hat{=}$  Umgebungstemperatur  $[K]$

für den Wärmedurchgang durch die Autoklavenwände, ergibt sich der erste Bestandteil der Wärmeabgabe an die Umgebung. Um nicht mit theoretischen Werten für die Materialeigenschaften zu rechnen, ist der enthaltene Wärmedurchgangskoeffizient für den Autoklav werksspezifisch empirisch zu ermitteln. Hierzu eignen sich Messungen während der Abkühlungsphase, da dann Zeiträume vorliegen (z. B. Phase (10)-(11)), in denen der Autoklav geschlossen gegenüber der Umgebung ist, sodass keine Energie zu- und nahezu keine Wärme aktiv abgeführt wird. Bei Heranziehen von über produktionsfreie Tage laufenden Härteprozessen minimiert sich aufgrund der Länge des Messzyklus der Einfluss von Messungenauigkeiten.

Bei digitaler Aufzeichnung der Härtekurve kann die mittlere Temperatur des Kesselinneren, wie in Bild 51 dargestellt, aus dem Mittelwert von Scheitel- und Sohlentemperatur abgeleitet werden. Mit dieser Anfangs- und Endtemperatur kann unter Verwendung von Formel (3.5) die abgegebene Wärmemenge

$$\Delta Q = Q(\varnothing T_1) - Q(\varnothing T_2) \quad (3.16)$$

berechnet werden, die als Wärmedurchgang für die betrachtete Dauer  $t_{T_2} - t_{T_1}$  in Formel (3.15) eingeht. Unter Berücksichtigung der Temperaturdifferenz zwischen Kesselinnerem zum Zeitpunkt  $t_{T_1}$  und der Umgebungstemperatur sowie der Außenfläche des Autoklavs kann schließlich der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  bestimmt werden. Durch Mittelwertbildung aus diversen Messungen kann die Genauigkeit dieses Werts gesteigert werden. Zudem besteht die Möglichkeit, AK-spezifische Wärmedurchgangskoeffizienten festzulegen, um die Modellgenauigkeit zu erhöhen.

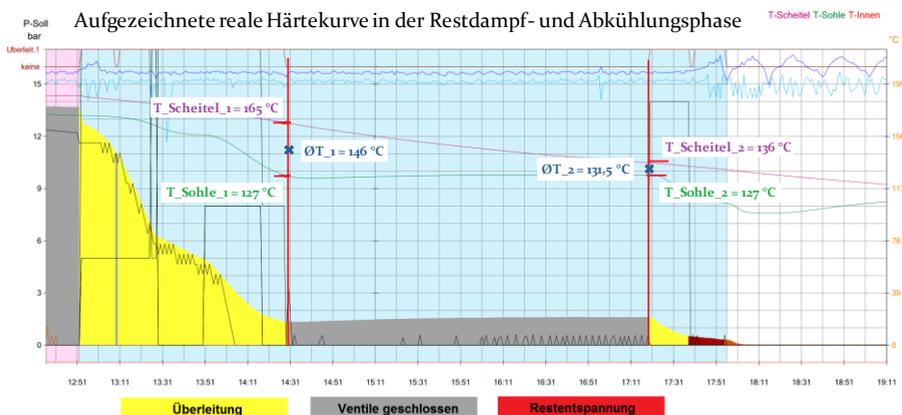


Bild 51: Berechnung der mittleren Temperatur  $\varnothing T$  des Kesselinneren aus einer aufgezeichneten realen Härtekurve während der Abkühlungsphase

Als zweiter Bestandteil der Wärmeabgabe an die Umgebung stellt sich die pro Stunde anfallende Kondensatmenge im Autoklav dar, die kontinuierlich abgeführt wird. Auch hier geht der errechnete Zeitwert  $t_{Phase(6)-(7)}$  als Faktor ein:

$$\dot{m}_{Kond} = \frac{3,6 \cdot Q_{ex}(t_{Phase(6)-(7)})}{\Delta H \cdot t_{Phase(6)-(7)}} \quad (3.17)$$

mit  $\Delta H \hat{=}$  Verdampfungswärme von Wasser (bei 200 °C: 1.939,67 kJ/kg)

Nachdem das Kondensat während der Haltephase entsteht, in der alle Komponenten nahezu dieselbe Temperatur aufweisen, ist die Temperatur des AK, an dessen Innenwand das Kondensat anfällt, nur minimal geringer als die des Wasserdampfes. Demnach kann für das Kondensat dieselbe Temperatur angesetzt werden wie für den AK. Hieraus errechnet sich die in Phase (6)-(7) durch das Kondensat an die Umgebung abgegebene Wärme mit der Formel

$$\Delta Q_{Kond} = c_{H2O} \cdot \dot{m}_{Kond} \cdot t_{Phase(6)-(7)} \cdot T_{AK} [^{\circ}C] \quad (3.18)$$

### Phase (7)-(8): Restdampfnutzung

In gleicher Weise wie in der vorherigen Phase gibt auch hier das System Wärme an die Umgebung ab. Dies wird nun jedoch nicht mehr durch Frischdampf kompensiert. Auch hier kann die erforderliche Härtezeit  $t_{Phase(7)-(8)}$  bis zur Erreichung des vorgegebenen *bar-h-Werts*  $\hat{\Lambda}_{Restdampf,HKE}$  mithilfe der Formeln (3.5), (3.9), (3.15) und (3.18) errechnet werden. Zur Vermeidung von Ungenauigkeiten aufgrund einer auf Annahmen basierenden, analytischen Lösung, wird in einzelnen Zeitschritten  $\Delta t_{Int}$  von beispielsweise 30 Sekunden überprüft, ob der *bar-h-Wert*  $\hat{\Lambda}_{Restdampf,HKE}$  erreicht ist. Durch diese Diskretisierung des dynamischen Ablaufs wird die Härtezeit der Restdampfphase  $t_{Phase(7)-(8)}$  in einem iterativen Vorgehen angenähert.

In jedem Iterationsschritt  $\iota \in \mathbb{N}$  wird unter Verwendung der Formeln (3.15) und (3.18) zunächst die in diesem Intervall abgegebene Wärme bestimmt. Mit Formel (3.5) lässt sich hieraus die neue Temperatur  $T_{\iota}$  des Gesamtsystems ableiten, die wiederum mithilfe von Formel (3.9) den neuen Druck  $p_{\iota}$  im AK festlegt. Eingesetzt in die Formel

$$\Delta\Lambda_{Restdampf,E} = \sum_{i=1}^l \frac{1}{2} \cdot (i \cdot \Delta t_{Int}) \cdot ((p_{i-1} - 1) + (p_i - 1)), \quad \text{mit } p_0 = \bar{p}_{HK_E} \quad (3.19)$$

ergibt sich der bisher in der Restdampfphase erreichte *bar-h-Wert*  $\Delta\Lambda_{Restdampf,E}$ . Sobald

$$\Delta\Lambda_{Restdampf,E} \geq \hat{\Lambda}_{Restdampf,HK_E} - \hat{\Lambda}_{Halte,HK_E} \quad (3.20)$$

gilt, wird  $\iota$  nicht mehr inkrementiert und die Schleife abgebrochen, sodass sich folgende Dauer mit dem entsprechenden Druck  $p_i$  im Kesselinneren einstellt:

$$t_{Phase(7)-(8)} = \iota \cdot \Delta t_{Int} \quad (3.21)$$

### 3.3.4 Dampfabgabe während der Abkühlungsphase

Im letzten Schritt führt dieser Abschnitt die Ermittlung der Dauern der einzelnen Phasen während der Abkühlung der Autoklaven auf.

#### Phase (8)-(9): Bereitschaft für Dampfspende

Das thermische Systemverhalten gestaltet sich in Phase (8)-(9) analog zur vorherigen Phase. Anstelle des Zusteuerns auf einen vorgegebenen *bar-h-Wert* zur Terminierung der Phase ist hier jedoch das Auffinden eines Empfängerkessels für die Dampfüberleitung vorgesehen. Zwar initiiert der Spenderkessel, wie Bild 50 zeigt, nicht den Überleitvorgang, sondern wartet auf Bedarfe anderer Kessel. Hierfür kommuniziert er stets seinen aktuellen Druck- und Temperaturstatus, der im Zeitverlauf veränderlich ist. Analog zu den Iterationsschleifen aus Phase (7)-(8) sind diese Werte kontinuierlich in hinreichend kurzen Zeitabständen  $\Delta t_{Int}$  zu aktualisieren. Neben dem Auffinden eines Empfängerkessels, wodurch bereits auf Phase (9)-(10) übergeleitet wird, wird das Abbruchkriterium (3.20) durch die Unterschreitung des maximalen Drucks  $\bar{p}_{S,RElim}$  für die Restentspannung

$$p_i \leq \bar{p}_{S,RElim} \quad (3.22)$$

ersetzt. Ist dieser Wert unterschritten, so wird direkt mit Phase (12)-(13) fortgefahren. Entsprechend ergibt sich für die Verweilzeit in Phase (8)-(9):

$$t_{Phase(8)-(9)} = \iota \cdot \Delta t_{Int} \quad (3.23)$$

### Phase (9)-(10): Dampfüberleitung (spendender Autoklav)

Die Zeit für die Dampfüberleitung in einen zugeordneten Empfängerkessel errechnet sich analog zur Methodik in Phase (2)-(3). Ist nach Abschluss der Überleitung der Grenzwert  $\bar{p}_{S,RElim}$  unterschritten, so wird direkt mit Phase (12)-(13) fortgefahren. Andernfalls erfolgt der Übergang in Phase (10)-(11).

### Phase (10)-(11): Bereitschaft für Dampfspende

Analog zu Phase (8)-(9).

### Phase (11)-(12): Dampfüberleitung (spendender Autoklav)

Analog zu Phase (9)-(10). Ist nach Abschluss der Überleitung der Grenzwert  $\bar{p}_{S,RElim}$  noch immer nicht erreicht, wird erneut Phase (10)-(11) durchlaufen.

### Phase (12)-(13): Entspannung des Kessels

Nach Unterschreitung des maximalen Drucks  $\bar{p}_{S,RElim}$  für die Restentspannung werden die Ventile des Kessels zur Umgebung geöffnet und der Restdampf sowie Dampf aus nachverdampftem<sup>14</sup> Kondensat strömt mit der Geschwindigkeit  $\nabla p_{HK\downarrow S}$  aus dem Autoklav. Ist der Umgebungsdruck  $p_U = 1,0 \text{ bar}$  erreicht, so können die Türen geöffnet (erforderliche Zeit:  $t_{\text{öff}}$ ) und der Autoklav entladen werden. Die hierzu benötigte Zeit ergibt sich aus der Formel

$$t_{\text{Phase}(12)-(13)} = \frac{\Delta p_S}{\nabla p_{HK\downarrow S}} + t_{\text{öff}}, \quad \text{mit } \Delta p_S = p_S - p_U \quad (3.24)$$

Durch Aufsummierung der einzelnen Zeitdauern aller Phasen errechnet sich die Gesamtdauer des Härteprozesses in einem Autoklav und somit die Bearbeitungszeit dieser Arbeitsstation  $t_{AK}$  im Simulationsmodell:

$$t_{AK} = \sum_{i=1}^{12} t_{\text{Phase}(i)-(i+1)} \quad (3.25)$$

---

<sup>14</sup> Aufgrund des sinkenden Drucks nimmt die Siedetemperatur des Wassers ab, sodass durch die enthaltene Wärme das vorhandene Wasser (z. B. in den KS-Poren, Kondensat) in Teilen wieder verdampft.

### Phase (13)-(1): Abkühlung des Autoklavs

Zur Verwendung möglichst präziser Ausgangstemperaturwerte für die am Härteprozess beteiligten Komponenten ist deren Abkühlverhalten in das DES-Modell zu integrieren. Neben den Rohlingen, deren Abkühlung bereits in Abschnitt 3.2.2 behandelt wird, ist dies besonders für die Autoklaven sowie die Härtewagen relevant. Zudem verhilft die Verfolgung des Feuchtwerts zu einer weiteren Präzisierung des Wassergehalts in den Rohlingen.

Nachdem sich die Härtewagen äquivalent zu den Rohlingen durch das Werk bewegen und in unterschiedlichen Bereichen verschiedene Aufenthaltszeiten aufweisen, ist für sie dieselbe Methodik wie für die Rohlinge anzuwenden. Auch der Feuchtwert der Rohlinge kann in Analogie zur Temperaturmessung, jedoch anstelle der Anwendung des Abkühlungsgesetzes mittels Regression für veränderte Einflussfaktoren, abgeleitet werden. Als Messmethode für den gravimetrischen Wassergehalt hat sich die Ofentrocknung des Materials nach DIN EN 1097-5 [287] als geeignet erwiesen.

Bei der Bestimmung der Abkühlung der Autoklaven als statische Objekte im Produktionssystem sind folgende Zustände zu unterscheiden und mit der Umgebungstemperatur in Abhängigkeit zu bringen (vgl. Bild 52):

1. Geschlossener Autoklav
2. Autoklav mit einer geöffneten Tür
3. Autoklav (Durchzugskessel) mit zwei zeitgleich geöffneten Türen

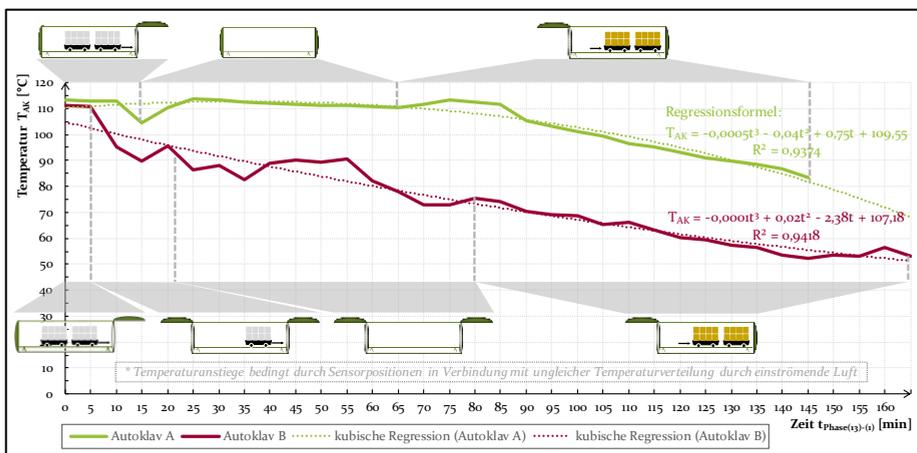


Bild 52: Empirischer Temperaturverlauf zweier Autoklaven in Abhängigkeit der Türöffnung von Trennstelle (13) bis (1)

Der Abkühlungsfaktor für diese drei Fälle kann in Analogie zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (s. Phase (6)-(7)) empirisch ermittelt werden. Hierbei werden jedoch nur die Wärmemenge  $\Delta Q_{AK}$  als einzig betrachtete Komponente sowie anstelle von Formel (3.15) das Newton'sche Abkühlungsgesetz (Formel (3.2)) eingesetzt. In Bild 52 aufgeführte empirische Messreihen zeigen die Abhängigkeit des Temperaturverlaufs von der Öffnung der Autoklaventüren und rechtfertigen demnach die differenzierte Betrachtung.

Die Vorgehensweise zur Integration in das DES-Modell folgt für alle Komponenten der Methodik aus Abschnitt 3.2.2. Bei den Autoklaven ist der Abkühlungsfaktor bei jeder Änderung des Türstatus eines Autoklavs anzupassen und der Temperaturwert entsprechend zu aktualisieren. Die letzte Aktualisierung erfolgt an Trennstelle (2), wenn der Härteprozess wieder gestartet wird. Als Ausgangstemperatur wird die Temperatur  $T_{AK}$  des Härtekessels an der Trennstelle (13) angesetzt.

### Implementierung

Für die Berücksichtigung der für die Autoklavierung relevanten thermischen Energieflüsse in einem KS-Werk sind an vielen Stellen Anpassungen in einem bestehenden DES-Modell vorzunehmen (vgl. Bild 53). Neben dem energetischen Verhalten im Härteprozess selbst sind für dessen Betrachtung besonders die vorgelagerten Prozesse bedeutend, da sich dort Temperaturen und Feuchtwerte von Eingangsparametern für die Härtung (z. B. Rohlingstemperatur/-feuchte, Härteagentemperatur) in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren verändern.

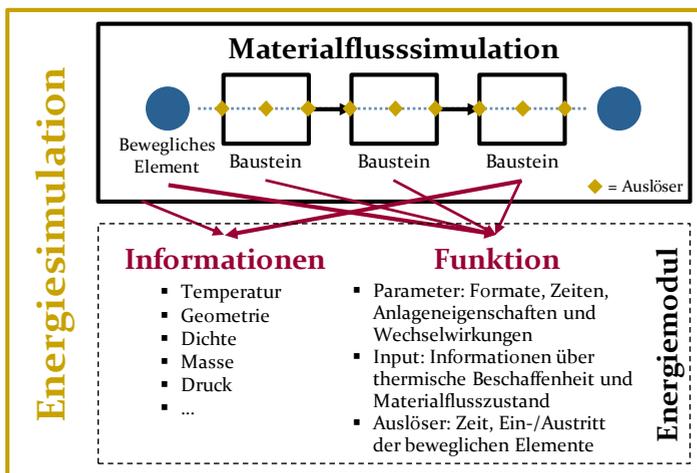


Bild 53: Implementierung der thermischen Energieflüsse im Härteprozess

Daher sind diese Informationen in Phase (13)-(1) zu aktualisieren, um über den Zeitverlauf zuverlässige Aussagen zu thermischen Material- und Anlagenzuständen treffen zu können und so einen realistischen Ausgangszustand für die Autoklavierung anzusetzen. Die Implementierung für die eingesetzten Materialien ist in Abschnitt 3.2.2 erläutert, und kann auf alle beweglichen Elemente (z. B. Härtewagen) übertragen werden. Das Vorgehen für statische Objekte (z. B. Autoklaven) ist ähnlich, jedoch ist deren thermischer Zustand nicht orts-, sondern zeitgesteuert zu aktualisieren, um stets aktuelle Informationen bereitzustellen.

Der Härteprozess selbst (Phase (1)-(13)) ist zunächst durch das Eintreten von Material in einen Autoklaven ausgelöst. Über die Eingangssteuerung und die angehängte Aktualisierung des Füllstands werden alle weiteren Vorgänge eingeleitet, die stets durch Wechselbeziehungen zwischen den Bausteinen geprägt sind. Diesbezügliche Informationen werden durch zentrale Tabellen im Netzwerk bereitgestellt und bezogen. Die Berechnungsfunktionalität selbst sowie spezifische Attribute sind einem jeden Autoklav inliegend, wobei die Vererbung von Anpassungen durch die Objektorientierung im Simulationswerkzeug sichergestellt sein muss. Erforderliche Informationen bezüglich des thermischen Zustands beziehen die Kessel direkt von den enthaltenen Objekten respektive aus dem umliegenden Netzwerk.



## **4 Verfahren zur automatisierten Generierung optimierter Fertigungsabläufe mittels Kopplung von Algorithmen und Simulationsmodellen**

Simulationsverfahren sind ohne menschliches Einwirken nicht in der Lage geeignete Untersuchungsszenarien zu generieren, um verschiedene Lösungsalternativen gegeneinander abzuwägen. Optimierungsverfahren hingegen besitzen diese Fähigkeit. Bei integrierter Betrachtung des Gesamtsystems ergeben sich jedoch so komplexe Optimierungsprobleme, dass zur Erzielung verwendbarer Ergebnisse Rechenzeiten anfallen, mit denen ein operativer Einsatz nicht realisierbar ist. Aus diesem Grund werden Simulation und Optimierung gekoppelt, um deren jeweilige Nachteile auszugleichen und deren Vorteile zu aggregieren.

Zu diesem Zweck ist das Gesamtsystem auf eine geeignete Zerlegbarkeit in Teilprobleme mit individuellen Zielstellungen sowie deren gegenseitige Abhängigkeit hin zu untersuchen und die Ziele gegeneinander zu priorisieren (Abschnitt 4.1). Ausgehend von dem Teilprozess, der den Engpass darstellt und entsprechend am höchsten zu priorisieren ist, werden Lösungsverfahren für die Einzelprobleme entwickelt (Abschnitte 4.2 - 4.4). Für ein ganzheitliches Ergebnis werden die Ergebnisse der Einzellösungen zusammengeführt, indem diese als Input an Teilprobleme mit niedrigerer Priorisierung übergeben werden.

Die Ausführungen der Folgeabschnitte sowie deren Validierung in Abschnitt 6.2 enthalten Gesichtspunkte aus den vom Autor am Lehrstuhl FAPS unterstützten studentischen Arbeiten [S1, S5, S15, S17, S19, S30, S41, S46-S49]. Teile der dargestellten Verfahren und Erkenntnisse wurden der Fachwelt in den Veröffentlichungen [P3, P5, P12] des Autors präsentiert.

### **4.1 Ganzheitliche simulationsgestützte Optimierung der Auftragssteuerung in der Kalksandsteinherstellung**

Um die Abläufe in der KS-Produktion übergreifend über alle Prozessschritte zu optimieren, wird das Gesamtsystem in vier Subsysteme mit individuellen Problem- und Zielstellungen zerlegt. Diese Aufteilung reduziert die Anzahl möglicher Kombinationen von Freiheitsgraden, sodass der Rechenaufwand erheblich abnimmt. Zur Harmonisierung der einzelnen

Teillösungen wird eine Methode dargestellt, die durch iteratives Durchlaufen der einzelnen Subsysteme und Übergabe der Ergebnisse des vorangegangenen Teilproblems einen Ausgleich der Zielkonflikte herbeiführt.

#### 4.1.1 Ziele und Komplexitätstreiber im Zusammenwirken der Prozessschritte

Zur Erreichung der übergeordneten Produktionsziele, alle Liefertermine bei konstant hoher Qualität zu möglichst geringen Kosten termingegenau zu erfüllen, leistet jeder Prozessschritt einen individuellen Beitrag. In einem Kalksandsteinwerk sind Kosteneinsparungen insbesondere durch effizienten Energie-, Rohstoff- und Personaleinsatz sowie gemäßigte Lagerhaltung zu realisieren. Hierbei muss die Lieferfähigkeit stets gewährleistet sein, um einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Baustoffen nicht zu verlieren.

Jeder Prozessschritt der KS-Herstellung besitzt individuelle Teilziele, die er zu erreichen sucht, um einen positiven Beitrag zur Gesamtzieelerreichung zu leisten. Diese Teilziele stehen jedoch in wechselseitigen Konflikten, die im Einzelnen in Bild 54 hervorgehoben sind. Diese Zielkonflikte sind dafür verantwortlich, dass sich die Optimierung des Gesamtproblems – und somit die gleichzeitige Berücksichtigung aller Teilziele – als komplex darstellt. Dieser Umstand wird in Anbetracht der vorliegenden zeitdynamischen Zusammenhänge verstärkt.

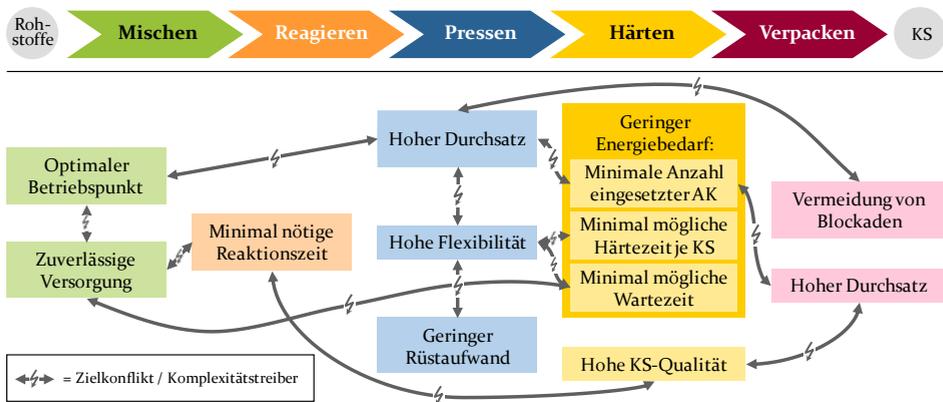


Bild 54: Teilziele und Komplexitätstreiber der einzelnen KS-Produktionsschritte

Diese impliziten Komplexitätstreiber, die aufgrund langer Rüstzeiten, stark variierender Bearbeitungszeiten und intensiver Wechselbeziehungen im Härteprozess zu einem unharmonischen Gesamtprozess führen, werden durch externe Einflüsse weiter verstärkt. So belastet die Marktsituation

durch saisonale oder konjunkturbedingte Nachfrageschwankungen das starr verkettete, in Losgrößen fertigende Produktionssystem. Zudem erhöht der kundengetriebene Variantenreichtum zusätzlich zum administrativen insbesondere den Planungsaufwand. Zusätzlich zu den prozessbedingten und wirtschaftlichen Komplexitätstreibern erschweren eine geringe Transparenz in der Produktion und das Fehlen von IT-Unterstützung die Produktionsplanung und -steuerung. Die komplexen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Prozessschritten lassen sich nicht durch Mitarbeiter analysieren und bewerten. Dies hat zur Folge, dass Engpässe und Kapazitätsverluste nicht im Voraus feststellbar sind.

Daher gilt es ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die Freiheitsgrade der Produktionssteuerung geeignet eingestellt werden, um zur Optimierung des Gesamtziels zu gelangen. Hierzu stellt der nachfolgende Abschnitt ein Lösungskonzept vor, das unter Anwendung von simulationsgestützter Optimierung eine ganzheitliche Bewältigung dieses Polylemmas ermöglicht.

#### **4.1.2 Dekompositionsverfahren zur Lösung des ganzheitlichen Problems**

Betrachtet man die einzelnen Prozessschritte der KS-Herstellung zusammen mit ihren in Bild 54 dargestellten Teilzielen, so ist festzustellen, dass die Erreichung eines vorgegebenen Produktionsergebnisses unter Berücksichtigung der Ressourceneffizienz von diversen Freiheitsgraden abhängt. Deren Einfluss auf den Ablauf des Fertigungsprozesses ist Tabelle 12 zu entnehmen.

#### **Dekompositionsverfahren zur Beherrschung der Komplexität**

Die gleichzeitige Suche nach der optimalen Ausprägung aller Freiheitsgrade stellt ein äußerst komplexes gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem dar. Allein bei der Suche nach der rüstzeitminimalen Pressenbelegung handelt es sich um ein NP-schweres Problem (vgl. Abschnitt 4.2.3). In Anbetracht der erforderlichen Rechenzeit bei praxisrelevanten Problemgrößen (vgl. [P5]) erweist sich demnach ein algorithmisches Lösungsverfahren für den betrieblichen Einsatz als nicht zielführend. Abhilfe schaffen in derartigen Fällen Dekompositionsverfahren, die das Gesamtproblem in beherrschbare Teilprobleme zerlegen, und diese abschließend wieder zusammenführen. Durch das Akzeptieren nur näherungsweise optimaler Lösungen (vgl. Heuristiken) gelingt es hiermit, geeignete Rechenzeiten zu erreichen.

4 Verfahren zur automatisierten Generierung optimierter Fertigungsabläufe mittels Kopplung von Algorithmen und Simulationsmodellen

Tabelle 12: Einfluss der Festlegung von Freiheitsgraden auf den Produktionsablauf

	Freiheitsgrad	Ausprägung	Absicht / Einfluss auf den Prozess
Mischen / Reagieren	Chargengröße Mischer	maximal optimaler Betriebspunkt	bestmögliche Nutzung der Maschinenkapazität optimaler Energieverbrauch, potenziell Versorgungsprobleme nachfolgender Prozessschritte
	Zeitpunkt Mischvorgang	früh spät	keine Versorgungsengpässe Verringerung des Temperaturverlusts im Rohmaterial
Pressen	Losgröße	groß	hohe Maschinenkapazitätsausnutzung, wenig Rüstaufwand
		klein	hohe Flexibilität, wenig Bestand
	Auftragsmix	Langsamläufer <sup>15</sup>	keine Engpasssituation vor dem Härteprozess
		Mix Schnellläufer <sup>15</sup>	keine Engpasssituation, kaum Temperaturverlust bei Rohlingen, Härtewagen und Autoklaven Temperaturverlust bei Rohlingen/Härtewagen abhängig von eintretenden Engpasssituationen, geringe Wartezeiten für Dampfüberleitung, hoher Gesamtdurchsatz
Umrüstungen	wenige	geringer Rüstaufwand, hoher Durchsatz	
	viele	hohe Anpassungsfähigkeit an Kundenbedarf (= Flexibilität), wenig Bestand	
Härten	Beschickung	sortenrein	minimale Härtezeit je KS
		gemischt	hoher Durchsatz, geringer Temperaturverlust bei Rohlingen, Härtewagen und Autoklaven
	Autoklaven-Anzahl	viele	geringe Wartezeit vor dem Härteprozess, hohes Dampfüberleitungspotenzial
		wenige	geringer Energiebedarf aufgrund weniger ab Umgebungstemperatur aufzuheizender AK
	Autoklaven-Wahl	beliebig LIFO <sup>16</sup>	hohe Flexibilität, gleichmäßige Anlagennutzung bestmöglicher Erhalt der AK-Temperatur
	Frischdampf-grenze $\bar{p}_{E,FDlim}$ <sup>17</sup>	hoch niedrig	geringer Gesamtenergiebedarf hoher Durchsatz, geringe AK-Anzahl
	Überleitgrenze $\bar{p}_{S,RElim}$ <sup>17</sup>	hoch niedrig	hoher Durchsatz, geringe AK-Anzahl hohes Überleitpotenzial, geringer Energiebedarf
Verpacken	Nachschubsteuerung	Push	hohe KS-Qualität
		Pull	keine Blockadesituation aufgrund gleichmäßiger Anlagenauslastung

<sup>15</sup> Langsam-/Schnellläufer: KS-Sorten, die aufgrund des Pressentakts oder/und des Volumens relativ langsam/schnell einen Härtewagen vollständig befüllen.

<sup>16</sup> LIFO: angelehnt an Last-in-First-out – es werden zuerst die Autoklaven befüllt, die zuletzt entleert wurden, sodass im Regelfall immer der Autoklav befüllt wird, der die höchste Temperatur aufweist.

<sup>17</sup> s. hierzu Abschnitt 3.3.2 und 3.3.4

Eine Studie von UPASANI/UZSOY [288] untersucht zwei Dekompositionsansätze für die Ablaufplanung eines Produktionssystems mit mehreren Engpässen. Zum einen wird die zeitliche Reduktion auf Basis der „rolling horizon procedure“ angewendet und durch eine örtliche Reduktion als „work centre-based problem reduction“ ergänzt. In der ersten Variante wird ein rollierendes Zeitfenster definiert, für das die Lösungsheuristik Ablaufpläne erstellt. Hierdurch wird durch die zeitliche Begrenzung die Anzahl der zu vergleichenden Planungsentscheidungen reduziert. Durch die örtliche Dekomposition wird das Ausgangsproblem auf die Teilbereiche reduziert, die einen maßgebenden Einfluss auf den Gesamtplan haben. So werden die Produktionsbereiche in „heavy loaded“ und „lightly loaded“ unterteilt. Die vorgestellte Heuristik streicht letztere aus dem zu optimierenden Gesamtsystem und ersetzt sie durch einfache Maschinen mit unendlicher Kapazität. Hierdurch wird das zu optimierende System weniger komplex, was Auswirkungen auf die Laufzeit der Optimierungsheuristik hat. [288]

Als Ergebnis der Untersuchungen wird festgehalten, dass das Dekompositionsverfahren schnell zu einem Ergebnis kommt, dessen Qualität im Vergleich zu einfachen Prioritätsregeln in fast allen Fällen leicht gesteigert ist. Der Einsatz von zeitlicher und örtlicher Reduktion ist jedoch nicht zwingendermaßen notwendig. In manchen Fällen liefert die örtliche Dekomposition bei alleiniger Anwendung bessere Ergebnisse. [288]

Neben dem Einsatz bei Ablaufplanungen sind weitere Nachweise für die erfolgreiche Anwendung der Dekompositionsstrategie zu finden. CHAMBERS ET AL. [289] wenden Dekompositionsverfahren mit Dominanzregeln erfolgreich zur Belegungsplanung einer Maschine, für die die Verspätung der Aufträge gewichtet minimiert werden soll, an. Zudem beschreiben ZHAI ET AL. [290] eine örtliche Dekompositionsstrategie, die für eine Werkstattfertigung mit mehreren Engpassmaschinen einen Arbeitsplan mit hoher Planungsqualität erstellt.

### **Dekomposition des Optimierungsproblems für eine effiziente KS-Produktion**

Bei der Anwendung der Dekomposition nach UPASANI/UZSOY [288] auf die KS-Produktion steht die örtliche Problemzerlegung im Fokus. Die zeitliche Dekomposition vollzieht sich von selbst in Form des Planungshorizonts. Für die örtliche Dekomposition wird das gesamte Produktionssystem in abgrenzbare, überschneidungsfreie Subprozesse untergliedert. Hierbei wurden die vier in Bild 55 eingegrenzten Bereiche (= Subsysteme) identifiziert

und nach Kritikalität absteigend geordnet. Gemäß dieser Priorisierung erfolgt auch die Abarbeitung im Dekompositionsverfahren (s. Bild 56). Leitmotiv dieser Problemzerlegung ist, dass einzelne Bereiche bei iterierender Simulation des gesamten Produktionsablaufs in unterschiedlichen Szenarien stets ein identisches Verhalten aufweisen würden. Dieses soll durch Dekomposition nur einmalig simuliert werden und als Ergebnis in andere Teilprobleme einfließen.

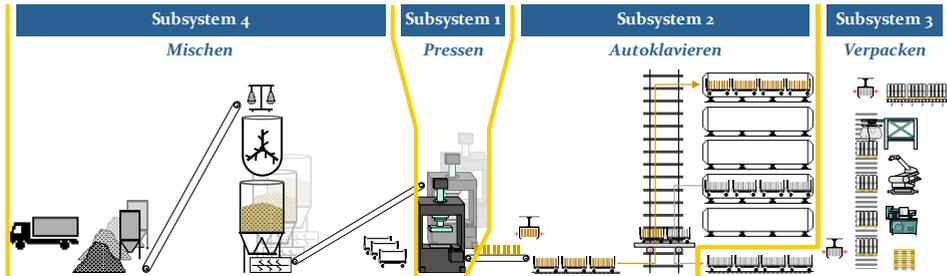


Bild 55: Dekomposition der KS-Produktion in vier Subsysteme

### Subsystem 1: Auftragsplanung für die Pressen

Auch wenn der Engpass des gesamten Produktionsprozesses aufgrund der im Regelfall vorherrschenden Energieeffizienzbestrebungen beim Härteprozess liegt, muss für die gesamtheitliche Optimierung zunächst die Pressenplanung untersucht werden. Denn durch sie wird festgelegt, wie viele Härtewagen, in welchem zeitlichen Abstand und mit welchen Steinsorten den Autoklaven zugeführt werden können. Die erste Optimierungsphase dient also der Schaffung einer Ausgangsbasis mit Restriktionen für die Optimierung des Autoklavenbereichs (Subsystem 2).

Für den Verdichtungsprozess an den Pressen sind vor allem die langen Rüstzeiten von bis zu zehn Stunden herausfordernd. Das Optimierungsziel in diesem Subsystem ist demnach, die Produktionsaufträge durch Aneinanderreihung ähnlicher Steinsorten so zu planen, dass die Dauer je Rüstvorgang unter Einhaltung vorgegebener Fertigstellungszeitpunkte minimal wird.

### Subsystem 2: Beschickung der Autoklaven mit Härtewagen

Auf Basis der Pressenaufträge als Ergebnis von Subsystem 1 können die Zeitpunkte errechnet werden, zu denen die Rohlinge auf Härtewagen gestapelt zu den Autoklaven gelangen können. Für Subsystem 2 besteht die Herausforderung darin, die Wagen zielgerecht den Härtekesseln zuzuweisen. Dies kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen und hängt in hohem

Maße von den ankommenden Rohlingen ab. In Zusammenhang mit dem Vorliegen diverser Freiheitsgrade für diesen Prozessschritt (s. Tabelle 12) gestaltet sich die Optimierung dieses Subsystems als komplex.

Ziel ist es, eine geeignete Anzahl eingesetzter Autoklaven und eine Beladungsstrategie zu finden, die die Planzeiten der ersten Optimierungsphase einhalten lassen. Dabei sollte als übergeordnetes Ziel durch geeignete Wahl der Härteparameter ein möglichst geringer Energieeinsatz realisiert werden.

### **Subsystem 3: Verpackungsdurchlauf**

Die Beschickung der AK wird in Subsystem 2 zugunsten einer geringen Laufzeit ohne Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen nachfolgender Prozessschritte geplant. Daher folgt in Subsystem 3 unter Verwendung der Ergebnisse aus der vorherigen Optimierungsphase die nachträgliche, simulative Überprüfung auf einen Engpass, der sich auf den Ablauf des vorherigen Prozessschritts auswirken würde. Im Falle einer rekursiven Auswirkung auf die vorangegangenen Subsysteme ist eine Alternativlösung heranzuziehen (s. hierzu Abschnitt 4.1.3).

### **Subsystem 4: Mischzeitpunkte unter Beachtung der Reaktionszeit**

Beim letzten Subsystem ist zu beachten, dass Rohmaterial durch Wartezeit viel Wärme an die Umgebung abgibt, die beim Härteprozess erneut eingebracht werden muss. Um diese Energie einzusparen wird der Zeitplan der Mischungsaufträge abhängig vom favorisierten Auftragsplan für die Pressen unter Berücksichtigung der Reaktionszeit rückwärtsterminiert. Hierbei wird die Simulation dazu eingesetzt, die Zeitpunkte der Materialbedarfe an den Pressen zu ermitteln.

## **4.1.3 Ganzheitliches Lösungskonzept auf Basis der Dekomposition**

Entsprechend der Anzahl an Subsystemen besteht das ganzheitliche Optimierungsverfahren aus vier Abschnitten, die über die Weitergabe der Lösungen der vorherigen Teilprobleme sukzessiv miteinander verknüpft sind. Diese werden mittels spezifischer Optimierungsverfahren, die in den nachfolgenden Abschnitten detailliert aufgeführt sind, innerhalb der einzelnen Subsysteme generiert. Die Subsysteme 1, 2 und 4 enthalten abgeschlossene Optimierungsvorgänge, die nur das jeweilige Subsystem betreffen, während Teilproblem 3 zur Optimierung das vorhergehende Subsystem einbezieht. In allen Subsystemen wird die Simulation zur Datenerhebung und

#### 4 Verfahren zur automatisierten Generierung optimierter Fertigungsabläufe mittels Kopplung von Algorithmen und Simulationsmodellen

Ergebnisvalidierung eingesetzt. Das Simulationsmodell wird stets nur für den aktuell zu optimierenden Produktionsschritt ausgeführt, um die Simulationsdauer so gering wie möglich zu halten. Hierzu ist der Startzustand der Simulation aus dem Endzustand des vorhergehenden Subsystems zu entnehmen. Bild 56 stellt die Zusammenführung der einzelnen Optimierungsphasen grafisch dar. Als übergreifendes Endergebnis werden die durch gegenseitige Gewichtung im Gesamtkontext besten Teillösungen zusammengesetzt.

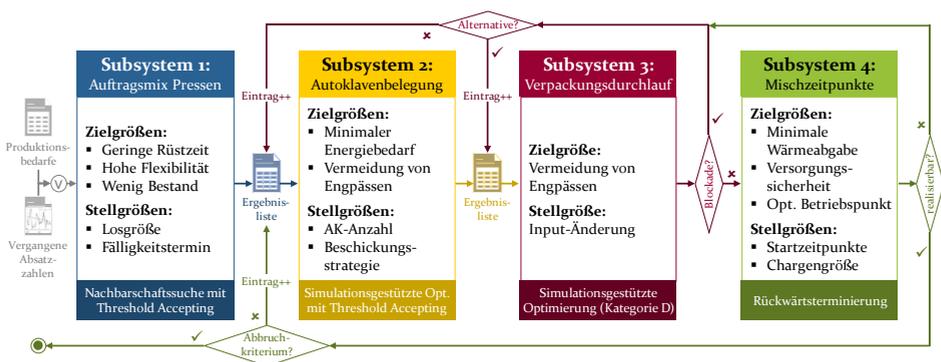


Bild 56: Sukzessive und rekursive Zusammenführung der Teilprobleme (Subsysteme) zur ganzheitlichen simulationsgestützten Optimierung des Produktionssystems

Den Ausgangspunkt für das Lösungsverfahren bilden Kunden- oder Produktionsbedarfe (Mengen und späteste Liefertermine), die auf Basis vergangener Absätze prognostiziert (s. Abschnitt 4.2.1) oder individuell vorgegeben werden können. Hieraus errechnet Subsystem 1 mithilfe einer Suchheuristik mit Schwellenakzeptanz (engl. *Threshold Accepting*) einen optimalen Auftragsmix (s. Abschnitt 4.2.2), wobei auch eine festzulegende Anzahl nächstbesten Lösungen in einer Ergebnisliste gespeichert wird.<sup>18</sup> Mithilfe der Simulation werden für den jeweiligen Auftragsmix die frühestmöglichen Bereitstellungszeitpunkte der Härtewagen für den Härteprozess errechnet. Diese dienen, nach der Lösungsgüte für Subsystem 1 absteigend sortiert, als Input für die zweite Optimierungsphase und werden dort schrittweise abgearbeitet.

Anhand parameterabhängiger Entscheidungsregeln (z. B. Beladungsstrategie, Anzahl Autoklaven) werden die bereitgestellten Härtewagen in Subsystem 2 den verfügbaren AK zugeordnet und simulativ das Verhalten des

<sup>18</sup> Bei hinreichend kleiner Anzahl an Fertigungsaufträgen (ein Wert von maximal 13 hat sich hier als angemessene Grenze ergeben) kann anstelle der Suchheuristik auch ein Algorithmus zur vollständigen Enumeration eingesetzt werden, der sogar die Optimallösung findet.

Systems bestimmt. Durch heuristische Variation der Parameter werden verschiedene Szenarien simuliert. Anhand einer Zielfunktion für die zweite Optimierungsphase wird derjenige Parametermix bestimmt, der den Zielkonflikt aus verursachter Wartezeit der bereitgestellten Härtewagen und erforderlichem Energieeinsatz am besten löst (s. Abschnitt 4.3). Erneut wird eine Ergebnisliste mit den nächstbesten Lösungen generiert, die an das nachfolgende Subsystem weitergegeben wird. Die Implementierung dieser Ergebnisübertragung der simulationsgestützten Optimierung zwischen den Subsystemen ist in Bild 57 dargestellt.

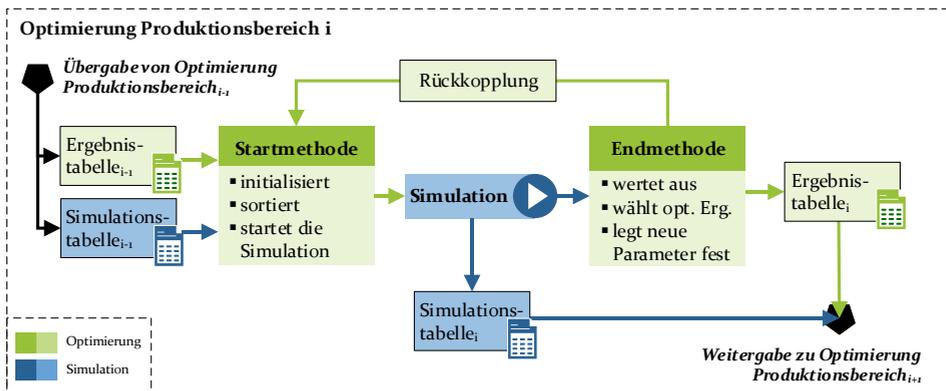


Bild 57: Implementierung der Verknüpfung der Subsysteme unter Anwendung von simulationsgestützten Optimierungsverfahren

In der dritten Optimierungsphase wird simulativ überprüft, ob das favorisierte Ergebnis aus Subsystem 2 zu einem Engpass in der Verpackung führt, der sich retrograd auf den Ablauf im vorhergehenden Subsystem auswirkt (s. Abschnitt 4.4.1). Sollte dies der Fall sein, werden die ersten Einträge der Ergebnisliste aus Subsystem 2 erneut simulativ untersucht, jedoch diesmal unter Einbezug von Subsystem 3. Sobald erstmals keine Blockade mehr eintritt, ist ein geeignetes Ergebnis gefunden. Daraufhin wird diese Iterationskette beendet und alle dabei errechneten Ergebnisse nach dem Wert der Zielfunktion sortiert. Sollte keine Alternative der Autoklavenbeschickung zu einer engpassfreien Lösung in der Verpackung führen, wird eine Rekursionsschleife angestoßen und mit dem nächstbesten Auftragsmix aus Subsystem 1 fortgefahren.

Den Abschluss des Lösungsverfahrens bildet Subsystem 4, in dem mittels Rückwärtsterminierung spätest mögliche Mischzeitpunkte errechnet werden (s. Abschnitt 4.4.2). Sollte sich hierbei herausstellen, dass die Kapazität der Mischer nicht ausreicht, um die Pressen zu den erforderlichen Zeit-

punkten mit Material zu versorgen, werden Rekursionsschleifen angestoßen, um alternative Ergebnisse aus den Subsystemen 2 und 3 heranzuziehen.

Lässt sich der vorgesehene Ablauf mit den Mischerkapazitäten vereinbaren, ist bereits eine sehr gute Lösung gefunden. Dennoch sollten in weiteren Rekursionen die nächstbesten Auftragsmixe, die einen hinreichend großen Unterschied zu den bereits untersuchten aufweisen, herangezogen werden. Sie führen möglicherweise zu einem harmonischeren Ablauf in den nachfolgenden Prozessschritten und so zu einem besseren Gesamtergebnis. Hierzu ist ein geeignetes Abbruchkriterium zu setzen, das erst nach Überschreiten einer vorgegebenen Laufzeit oder Iterationsanzahl den iterativen Durchlauf von Subsystem 2 bis 4 beendet.

Durch die Dekompositionsstrategie ist zwar – wie bei allen laufzeiteffizienten, heuristischen Verfahren – nicht sichergestellt, dass eine Optimallösung für das Gesamtproblem gefunden wird. Sie bietet aber aufgrund ihrer Modularität den Vorteil, dass einzelne Subsysteme durch alternative Verfahren oder Vorgaben ersetzt werden können. So kann beispielsweise ein extern erstellter Produktionsplan für die Pressen als Ergebnisliste an das Subsystem 2 übergeben werden. Dies ist insbesondere von Relevanz, wenn mithilfe des Lösungsverfahrens zügig auf auftretende Ereignisse in der Produktion reagiert werden soll. Diese Anforderung wird detailliert in Kapitel 5 behandelt. Ebenso bietet sich durch die modulare Integration der Optimierungsalgorithmen die Möglichkeit, die Simulation konventionell ohne Optimierungsfunktion einzusetzen, was Kapitel 3 adressiert.

## 4.2 Verfahren zur Ermittlung optimaler Losgrößen und zur Reihenfolgeplanung

Da eine Optimierung des Engpassprozesses (Autoklavierung) ohne Berücksichtigung von Rüstzeitrestriktionen aus dem Pressenbereich zu Losgrößen führen würde, die nicht ökonomisch umsetzbar sind, stellen die Pressen das erste zu optimierende Subsystem dar (s. Abschnitte 4.2.2 und 4.2.3). Die Ergebnisse hieraus bilden die Ausgangsbasis für die Disposition der fertig beladenen Härtewagen auf die Autoklaven. Die Optimierung der Losgrößen und terminlichen Reihenfolgen der Aufträge auf den Pressen setzt auf einer optimierten Absatzplanung für KS-Werke auf, um bedarfsgerecht KS-Sorten und deren Mengen für die Produktion einzuplanen. Diese errechnet mittels statistischer Verfahren, die auf Nachfragemustern aus der Vergangenheit basieren, und deren nachfolgender Anpassung anhand von

Informationen aus dem Vertrieb die voraussichtlichen Absatzmengen (s. Abschnitt 4.2.1).

#### 4.2.1 Methodik zur Absatzplanung in KS-Werken

Um realistische Ergebnisse aus Simulationsstudien mit langfristigem Planungshorizont zu erhalten, ist eine realitätsnahe Ausgangsbasis essentiell. Dies gilt besonders für die zu fertigenden Güter, deren Menge und Verteilung über den Untersuchungszeitraum maßgeblichen Einfluss auf die Kapazitätsauslastung und den Durchsatz nimmt. Demnach wirkt sich eine fundierte Absatzplanung positiv auf die Relevanz der Simulationsergebnisse aus und übertrifft das gängige Vorgehen, Absatzmengen aus früheren Zeiträumen heranzuziehen.

Kalksandsteine werden für die Erstellung von Neubauten sowie zum Teil für die Erweiterung und Renovierung von Bestandsbauten eingesetzt. Endkunden stellen somit Bauherren und Bauträger respektive deren Auftraggeber dar. Sie entscheiden jedoch meist nicht über die Verwendung des Baustoffs. Dies obliegt den beauftragten Bauunternehmen, deren Entscheidung wiederum oftmals von der Vorstellung des Architekten beeinflusst ist. Als Vertriebspartner steht ein Baustoffhändler zwischen KS-Werk und Bauunternehmen, der verschiedene Baustoffe vorhält oder auftragsgerecht beschafft. Diese in Bild 58 repräsentierte Vertriebsstruktur erschwert aufgrund ihrer Mehrstufigkeit die Planung von Absatzmengen für einen längerfristigen Zeitraum.

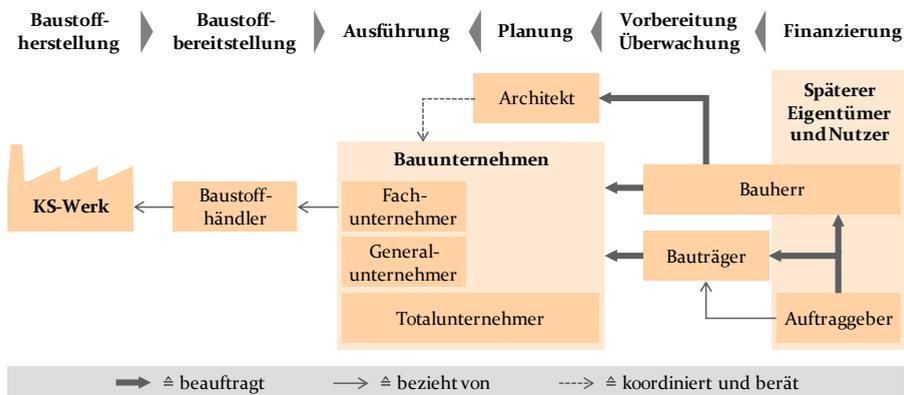


Bild 58: Mehrstufige Vertriebsstruktur für Kalksandsteine

Zwar kann durch Rahmenverträge und projektspezifische Zusammenarbeit mit Baustoffhändlern sowie regelmäßigen Informationsaustausch und zielgerichtetes Marketing gegenüber Bauunternehmen und Architekten die

Transparenz erhöht und die Entscheidung hin zu KS beeinflusst werden, jedoch sind die finalen Absatzmengen weiterhin durch hohe Unsicherheit geprägt. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass bei Bedarf sogar während der Errichtung des Mauerwerks Steine mit anderen Charakteristika (z. B. Wanddicke, Rohdichte) angefordert werden.

Aufgrund dieser späten Festlegung der einzusetzenden Steinsorten und der fehlenden Entscheidungsregeln für die Auswahl des zu verwendenden Baustoffs bei Bauprojekten, eignet sich die Absatzprognose auf Basis qualitativer Verfahren nur bedingt. Es empfiehlt sich daher die Absatzmengen für den Planungshorizont aus Vergangenheitsdaten abzuleiten und in der Simulation einzusetzen. So ist eine realistische Ausgangsbasis für Simulationläufe gegeben. Ein sehr mächtiges Werkzeug stellen hierfür autoregressive Verfahren der Zeitreihenanalyse dar (vgl. Abschnitt 2.2.2). Um diese einzusetzen, sollte in den folgenden Schritten vorgegangen werden:

1. **Modellidentifikation:**  
Auswahl eines geeigneten autoregressiven Modells
2. **Modellspezifikation:**  
Ermittlung von passenden Modellparametern
3. **Modelldiagnose:**  
Überprüfung des Modells mittels geeigneter Tests
4. **Modellanwendung:**  
Einsatz des Modells zur Prognose

Zur Wahl des richtigen Zeitreihenmodells ist grundlegende Kenntnis über das Datenverhalten erforderlich. Diese kann mithilfe grafischer Methoden (insb. Zeitreihendiagramm) erlangt werden. Hieraus ist beispielsweise ersichtlich, ob die Daten trendbehaftet sind oder einen saisonalen Verlauf aufweisen. Für KS trifft beides zu. Aufgrund der hohen Substituierbarkeit der meisten Steinformate und der Entscheidungsindividualität der Bauunternehmer, deren Entscheidungsverhalten in Abhängigkeit der Kundenbetreuungsmaßnahmen variiert, treten durch Präferenzierung und Umorientierung Nachfragetrends auf. Wegen der Winterschließung in den KS-Werken und der geringeren Bautätigkeit in den kalten Monaten des Jahres zeigen die Absatzdaten zudem saisonale Schwankungen, wobei eine Saison eine Länge von einem Jahr aufweist.

Folglich lässt sich als geeignetes Zeitreihenmodell ein  $SARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$ -Modell identifizieren. Die Festlegung der Modellparameter hängt von den vorliegenden Zeitreihen ab. So gilt für die Saisonkomponente  $s$ :

- $s = 12$  bei Absatzmengen auf Monatsbasis
- $s = 52$  bei Absatzmengen auf Wochenbasis
- $s = 365$  bei Absatzmengen auf Tagesbasis

Oftmals zeigt sich ein saisonaler Trend, da bestimmte KS-Sorten in einem Jahr höher präferiert werden als im vorangegangenen Jahr. Entsprechend ist  $D \geq 1$  zu wählen. Liegen solche Trends, wie in Bild 59 auftretend, unterjährig vor, gilt auch für die nicht-saisonale Trendkomponente  $d \geq 1$ .

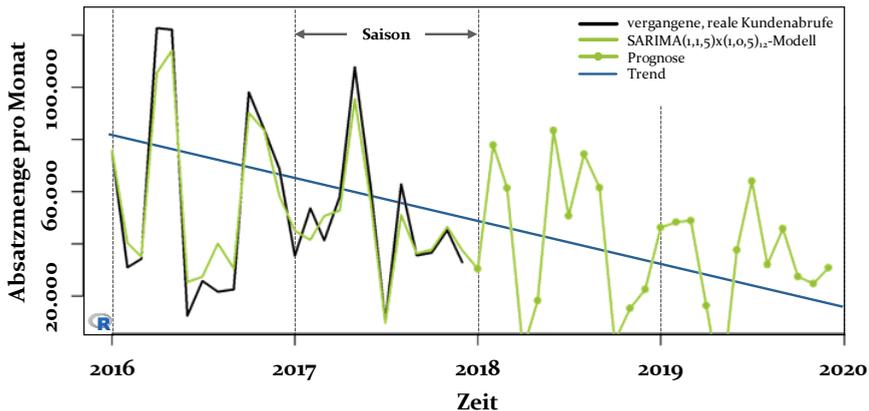


Bild 59: Exemplarische Anwendung eines SARIMA-Modells auf eine Absatzkurve einer KS-Sorte mit Trend und Saisonalität

Der festgelegte Wert hängt von dem Grad der Trendentwicklung ab. Im Regelfall liegt ein linearer Trend vor, weshalb meist der Wert 1 gewählt wird. Die passenden Werte für  $p, q, P$  und  $Q$  sollten mittels automatisierter Selektionsverfahren, z. B. durch Minimierung des AIC oder BIC (s. Abschnitt 2.2.2), aus den vorliegenden Zeitreihen abgeleitet werden, wodurch zeitgleich die Modellgenauigkeit diagnostiziert wird.

Wie von STADTLER/KILGER [49] allgemein beschrieben, eignen sich derartige Verfahren häufig nur für Güter mit regelmäßigen und mittleren bis großen Absatzmengen. Entsprechend liefert für KS-Werke eine solche Betrachtung für C-Güter<sup>19</sup> keinen Mehrwert, da diese häufig nur von einzelnen Kunden an wenigen Tagen im Jahr für spezielle Bauprojekte nachgefragt werden. Demnach ist für C-Güter ein gesondertes Verfahren anzuwenden, um sie realitätsgetreu in eine Simulation einzubeziehen.

<sup>19</sup> Als C-Güter in KS-Werken können alle Steinsorten angesehen werden, deren Nachfrage so gering ist, dass von ihnen nur wenige Male im Jahr eine Autoklavenladung produziert werden muss.

Ein geeigneter Ansatz besteht darin, die Zeitreihen aller C-Güter zu aggregieren und sie in der Prognose als ein regelmäßig nachgefragtes Gut gemäß dem oben dargestellten Verfahren zu behandeln. So können Absatzschwankungen im Jahresverlauf und Trends über die Jahre in der Simulation berücksichtigt werden. Anhand von Durchschnittsmengen für die Steinanzahl pro Autoklav kann sodann ermittelt werden, wie häufig pro Planungsintervall eine Autoklavenladung an C-Gütern zu produzieren ist. Diese werden dann entsprechend der prognostizierten Absatzmengen je Zeitintervall in den Produktionsplan integriert (vgl. Bild 6o). Auch in der realen Produktion wird im Regelfall wie in Bild 6o dargestellt vorgegangen, dass bei der Reihenfolgeplanung freie Slots für C-Güter vorgehalten werden. Diese werden in Abgleich mit dem Lagerbestand und bestehenden Kundenaufträgen mit der Sorte besetzt, deren Vorrat als nächstes aufgebraucht sein wird.

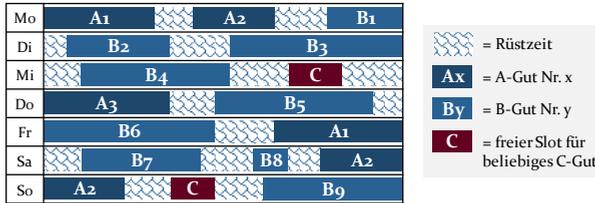


Bild 6o: Umgang mit C-Gütern in der Reihenfolgeplanung

Das dargestellte Prognoseverfahren kann demnach nicht nur für langfristige Planungshorizonte, sondern in gleicher Form auch für Simulationen kürzerer Zeiträume eingesetzt werden. Hier stellt es als Generator der Nachfragemengen und Auslieferzeitpunkte nach Gegenüberstellung mit dem vorhandenen Lagerbestand den Ausgangspunkt für die Losgrößenplanung dar, für die im nachfolgenden Abschnitt eine Berechnungsmethodik vorgestellt wird. Diese wiederum liefert den Input für das DES-Modell.

Um die Berechnung der Absatzmengen noch präziser zu gestalten, könnten die Zeitreihen durch Informationen von Vertriebsmitarbeitern von Ausreißern bereinigt und Prognosen entsprechend um Sonderaufträge ergänzt werden. So verfälschen keine einmaligen Nachfrageänderungen wie Großprojekte oder Spezialbestellungen die Zeitreihenprognosen. Um weitere Einflussfaktoren wie aufkommende Trends zu bestimmten Steinsorten, Vertriebsaktivitäten, Abhängigkeiten von Komplementärgütern oder das Wetter in die Prognosen einzubeziehen, können multivariate, kausale Modelle eingesetzt werden. Dies ist jedoch mit höherem Aufwand verbunden. Für langfristige Simulationen reichen die aufgeführten SARIMA-Modelle im Regelfall aus.

### 4.2.2 Optimierungsmodell zur Losgrößenoptimierung und Reihenfolgeplanung

Basierend auf tage- oder wochenweise prognostizierten respektive avisierten Absatzmengen sind nach Gegenüberstellung mit den vorliegenden Lagerbeständen späteste Fertigstellungszeitpunkte für die Produktion ermittelbar. Um bei einer Losfertigung Rüst- und Lagerkosten gleichermaßen gering zu halten, sind hierfür optimale Losgrößen zu ermitteln. Dies ist in Anbetracht eines zu erreichenden Durchsatzes umso entscheidender, wenn Werkzeugmaschinen mit erhöhtem Rüstaufwand vorliegen, wie es bei den Pressen in KS-Werken der Fall ist. Ist ein neuer Fertigungsauftrag auszuführen, so ist dieser Bereich für die insgesamt anfallende Rüstzeit ausschlaggebend und demgemäß bei der Losgrößenoptimierung zu fokussieren.

Stellt man zur Ermittlung optimaler Losgrößen einzig Rüst- und Lagerkosten für einen Planungszeitraum gegenüber, so vernachlässigt man dabei unter anderem die begrenzten Kapazitäten der Produktionsanlagen. Bezieht man diese mit ein, so ist bei reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten, wie sie an KS-Pressen vorliegen, erst bei simultaner Reihenfolgeoptimierung sichergestellt, dass die optimalen Losgrößen hinreichend genau errechnet werden. Bei deren Berechnung für die KS-Herstellung sind demnach folgende Rahmenbedingungen aus Tabelle 13 zu beachten:

Tabelle 13: Rahmenbedingungen der Losgrößenoptimierung für das Pressen von Kalksandsteinen

Zielgrößen	Anforderungen/Restriktionen	Voraussetzungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Minimale Gesamt-rüstzeit</li> <li>▪ Minimale Lagerkosten</li> <li>▪ Möglichst geringer Abstand zu Fälligkeitsterminen</li> <li>▪ Möglichst geringe Überschreitung von Fälligkeitsterminen</li> <li>▪ Minimale Herstellkosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reihenfolgeabhängige Rüstzeiten</li> <li>▪ Mehrere parallele, nicht-identische Maschinen</li> <li>▪ Sortenspezifische Zykluszeiten</li> <li>▪ Maschinenabhängige Produktionskosten</li> <li>▪ Produktabhängige Maschinenbelegung</li> <li>▪ Keine konstante Nachfrage</li> <li>▪ Keine gleichzeitige Bearbeitung eines Produkts auf mehreren Maschinen</li> <li>▪ Maximal ein Los je Produkt je Periode</li> <li>▪ Begrenzte Produktionskapazitäten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einstufige Produktion ohne Zwischenlager</li> <li>▪ Stets ausreichende Kapazität vorhergehender und nachfolgender Prozesse (durch Dekompositionsverfahren einhaltbar)</li> </ul>

Um für die vorliegende Problemstellung ein Optimierungsmodell zu erstellen, ist ein geeigneter Modellierungsansatz zu identifizieren. Gemäß der Herleitung in Abschnitt 2.2.3 deckt das GLSP nach FLEISCHMANN/MEYER [112, 291] die Anforderungen aus Tabelle 13 weitgehend ab und stellt zugleich ein

geeignetes Lösungsverfahren vor. Integriert man hier die in Bild 61 ergänzten, im GLSP noch nicht berücksichtigten Anforderungen als weitere Nebenbedingungen, so ergibt sich ein auf die KS-Herstellung zugeschnittenes Losgrößen- und Reihenfolgeoptimierungsmodell (GLSPPLB – *GLSP with parallel lines and backloging*). Für eine präzisere Herleitung der Übertragung sei auf [P12] verwiesen.

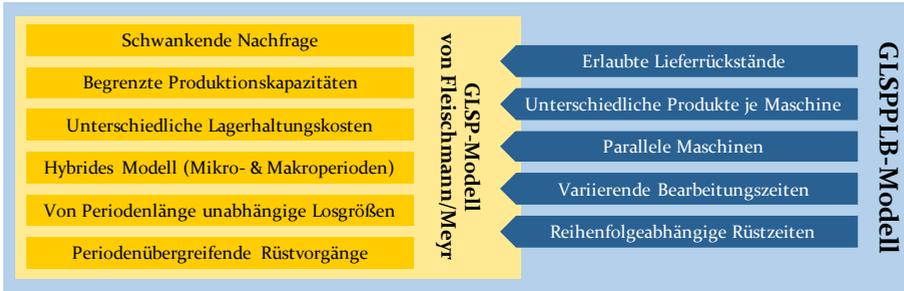


Bild 61: Erweiterung des GLSP nach Fleischmann/Meyr [60] zur Verwendung in KS-Werken

Die zu minimierende Zielfunktion des daraus hervorgehenden Optimierungsproblems besteht aus den vier Komponenten Lagerhaltungs-, Lieferverzugs-, Produktions- und Rüstkosten, die über den Kostenfaktor gewichtet werden können. Das Ziel, Lose erst möglichst kurz vor der Fälligkeit fertigzustellen, ist implizit in den Lagerkosten enthalten. Die in Tabelle 13 genannten Anforderungen fließen als Nebenbedingungen in die nachfolgend aufgeführte gemischt-ganzzahlige Modellformulierung ein:

$$\min \sum_{i \in \mathbb{I}} \sum_{t \in \mathbb{T}} \left( \overbrace{y_{i,t} c_i^h}^{\text{Lagerhaltungskosten}} + \overbrace{b_{i,t} c_i^p}^{\text{Lieferverzugskosten}} \right) + \sum_{m \in \mathbb{M}} \sum_{s \in \mathbb{S}_{mt}} \left( \overbrace{x_{i,mts} c_m^p}^{\text{Produktionsk.}} + \sum_{j \in \mathbb{I}, j \neq i} \overbrace{z_{ji,mts} r_{ji} c^c}^{\text{Rüstkosten}} \right) \quad (4.1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$y_{i,t} = y_{i,t-1} + \sum_{m \in \mathbb{M}} \sum_{s \in \mathbb{S}_{mt}} x_{i,mts} - d_{i,t} - b_{i,t-1} + b_{i,t} \quad \forall i, t \quad (4.2)$$

$$C_{mt} \geq \sum_{i \in \mathbb{I}} \sum_{s \in \mathbb{S}_{mt}} \left( x_{i,mts} p_i + \sum_{j \in \mathbb{I}, j \neq i} z_{ji,mts} r_{ji} \right) \quad \forall m, t \quad (4.3)$$

$$x_{i,mts} \leq \begin{cases} \frac{C_{mt}}{p_i} \omega_{i,mts}, & \text{wenn } s = 1, \\ \frac{C_{mt}}{p_i} \sum_{j \in \mathbb{I}, j \neq i} z_{ji,mts}, & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall i, m, t, s \quad (4.4)$$

$$\sum_{i \in \mathbb{I}} \omega_{i,mts} = 1 \quad \forall m, t, s \quad (4.5)$$

$$z_{ik,mts} = \begin{cases} \omega_{i,m(t-1)S_{mt}}, & \text{wenn } s = 1, \\ \omega_{i,mt(s-1)}, & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall i, m, t, s \quad (4.6)$$

$$\sum_{m \in \mathbb{M}} \left( z_{ii,mt1} + \sum_{s \in \mathbb{S}_{mt}} \sum_{j \in \mathbb{I}, j \neq i} z_{ji,mts} \right) \leq 1 \quad \forall i, t \quad (4.7)$$

$$\omega_{i,mts} \leq \zeta_{i,m} \quad \forall i, m, t, s \quad (4.8)$$

$$y_{i,0} = \sum_{t \in \mathbb{T}} \left( d_{i,t} - \sum_{m \in \mathbb{M}} \sum_{s \in \mathbb{S}_{mt}} x_{i,mts} \right) \quad \forall i \quad (4.9)$$

$$b_{i,0} = b_{i,T} = y_{i,T} = 0 \quad \forall i \quad (4.10)$$

$$z_{ii,m0S_{mt}} = \omega_{i,m}^0 \quad \forall i, m, s \quad (4.11)$$

$$\sum_{s \in \mathbb{S}_{mt}} x_{i,m0s} = 0 \quad \forall i, m \quad (4.12)$$

$$z_{ji,mts} \in \{0; 1\} \quad \forall i, j, m, t, s \quad (4.13)$$

$$x_{i,mts}, y_{i,t}, b_{i,t} \in \mathbb{Z}_0^+ \quad \forall i, m, t, s \quad (4.14)$$

mit

Indexmengen	
$i, j, k \in \mathbb{I}$	Produkte $i = 1, \dots, I$
$m \in \mathbb{M}$	Maschinen $m = 1, \dots, M$
$t \in \mathbb{T}$	Makroperioden $t = 1, \dots, T$
$s \in \mathbb{S}_{mt}$	Mikroperioden $s = 1, \dots, S_{mt}$
$\mathbb{S}_{mt}$	Menge der Mikroperioden in einer Makroperiode $t$ für Maschine $m$

4 Verfahren zur automatisierten Generierung optimierter Fertigungsabläufe mittels  
Kopplung von Algorithmen und Simulationsmodellen

Parameter	
$c^c$	Rüstkostensatz
$c_i^h$	Lagerkostensatz für eine Einheit von Produkt $i$
$c_i^b$	Strafkostensatz für verspätete Produktion einer Einheit von Produkt $i$
$c_m^p$	Produktionskostensatz von Maschine $m$
$C_{mt}$	Kapazität von Maschine $m$ in Makroperiode $t$
$p_i$	Zykluszeit einer Einheit von Produkt $i$
$r_{ji}$	Rüstkosten von Produkt $j$ auf Produkt $i$
$d_{i,t}$	Nachfrage nach Produkt $i$ in Makroperiode $t$
$\zeta_{i,m}$	Binäre Konstante, die angibt, auf welchen Maschinen $m$ Produkt $i$ gefertigt werden kann (= 1, bedeutet, dass das Produkt $i$ auf Maschine $m$ gefertigt werden kann)
Ganzzahlige Variablen	
$x_{i,mts}$	Losgröße von Produkt $i$ auf Maschine $m$ in Mikroperiode $s$ in Makroperiode $t$
$y_{i,t}$	Lagerbestand des Produktes $i$ am Ende von Makroperiode $t$
$b_{i,t}$	Nicht rechtzeitig erfüllbare Bedarfsmengen von Produkt $i$ in Makroperiode $t$
Binärvariablen	
$z_{ji,mts}$	Umrüstvariable (= 1, wenn in Mikroperiode $s$ in Makroperiode $t$ auf Maschine $m$ von Produkt $j$ auf $i$ umgerüstet wird, sonst = 0)
$\omega_{i,mts}$	Rüstzustandsvariable (Abkürzung für $\sum_{j \in \mathbb{I}} z_{ji,mts}$ ) (= 1, wenn in Mikroperiode $s$ in Makroperiode $t$ auf Maschine $m$ für Produkt $i$ gerüstet ist, sonst = 0)

Als Einschränkung der Zielfunktion dient Nebenbedingung (4.2) zur kontinuierlichen Aktualisierung des Lagerbestands über alle Perioden unter Einbezug der noch nicht erfüllten Bedarfe  $b_{i,t}$ . Um die Produktionskapazitäten der Maschinen in jeder Periode zu berücksichtigen, schränkt Ungleichung (4.3) die Produktions- und Rüstzeit in Abhängigkeit der Periode ein. Damit ein Los nur zur Fertigung eingeplant werden kann, wenn die Maschine für dieses gerüstet ist, wird Nebenbedingung (4.4) eingesetzt. Die nachfolgende Summenformel (4.5) stellt sicher, dass nur ein Produkt zur gleichen Zeit auf einer Maschine gefertigt wird. In diesem Kontext dient Nebenbedingung (4.7) dazu, dass ein Produkt nicht zeitgleich auf mehreren Maschinen gefertigt wird. Darüber hinaus sorgt sie dafür, dass in jeder Makroperiode nur einmal auf Produkt  $i$  umgerüstet werden kann, um die Anzahl der Rüstvorgänge zu limitieren. Zur Übertragung von Rüstzuständen zwischen zwei Mikroperioden ist Formel (4.6) erforderlich. Nebenbedingung (4.8) sorgt dafür, dass Restriktionen hinsichtlich der Bearbeitbarkeit von Produkt  $i$  auf Maschine  $m$  eingehalten werden. Die übrigen Gleichungen (4.9)-(4.12) stellen Start- und Endbedingungen für Lagerbestände, Lieferrückstände und Rüst- und Fertigungszustände dar. Als Abschluss spezifizieren die Angaben in (4.13) und (4.14) die Lösungsräume der Variablen.

### 4.2.3 Zugeschnittene Lösungsheuristik

Dieses Modell lässt sich nach der Scheduling-Notation nach PINEDO [96] (s. a. Abschnitt 2.2.3) als  $Rm|s_{jk}, M_j|\sum w'_i C_i + \sum w''_i E_i + \sum w'''_i T_i$  klassifizieren. Nachdem bereits ein klassisches Scheduling-Problem für parallele Maschinen mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten NP-schwer ist, gilt dies auch für Erweiterungen (vgl. [292]) entlang der in [96] aufgeführten Komplexitätshierarchien. Entsprechend gilt auch für das vorliegende Problem, dass es NP-schwer ist. Es liegt folglich kein Algorithmus vor, der dieses Problem in Polynomialzeit lösen würde. Aus diesem Grund ist für die Anwendung in KS-Werken auf heuristische Lösungsverfahren zurückzugreifen, welche Näherungslösungen liefern. FLEISCHMANN/MEYR [112, 291] stellen ein lokales Nachbarschaftssuchverfahren mit Threshold-Accepting Verfahren zur Erweiterung des Suchraums vor, das sich für den Einsatz bei GLSP-Modellen eignet. Dieses ist zur Anwendung auf das GLSPPLB-Optimierungsproblem zu erweitern. Der grundlegende Ablauf ist im Folgenden aufgezeigt. Für eine detailliertere Erläuterung der Schritte der Heuristik sowie der Bestimmung der Losgrößen sei auf [P12] verwiesen.

#### Ablauf der Heuristik

Ausgehend von einem beliebigen initialen Plan wird eine Nachbarschaftsoperation aus Tabelle 14 zufällig ausgewählt und angewendet, um einzelne Lose zu ergänzen, ändern, tauschen oder entfernen.

Tabelle 14: Nachbarschaftsoperationen der Lösungsheuristik für das GLSPPLB-Modell

Operation	Beschreibung
Einfügen	Zufällige Auswahl eines Produkts (bevorzugt mit offenen Bedarfen) als neues Los auf der Maschine mit den geringsten Produktionskosten in einer zufällig gewählten Periode
Löschen	Zufälliges Entfernen eines Loses aus dem Plan
Austauschen (periodenbezogen)	Austausch zweier zufällig gewählter Lose innerhalb einer Periode
Verschieben und Einfügen	Übertragung eines zufällig gewählten Loses auf eine andere Maschine innerhalb derselben Periode und Generierung eines neuen Loses (siehe „Einfügen“) an der ursprünglichen Stelle
Austauschen (maschinenbezogen)	Austausch zweier unterschiedlicher Lose auf derselben Maschine aus unterschiedlichen Perioden

Nach dieser Anpassung der Losabfolge werden die Losgrößen wieder periodenweise, ausgerichtet an Faktoren wie Kundenbedarfen, Rüstzeiten und

voraussichtlichen Lieferrückständen, mittels Rückwärtsterminierung berechnet, um so einen neuen Plan zu generieren. Ist dieser besser oder maximal um einen vorab definierten Grenzwert („Threshold“)  $Y$  schlechter als der bisher beste Plan, so wird der neue Plan die Ausgangsbasis für die nächste Nachbarschaftsoperation.

Ist nach einer vorgegebenen Anzahl an Iterationen kein neuer Plan gefunden, wird  $Y$  in festgelegten Schritten bis zu seinem Minimalwert  $Y_{\min}$  reduziert, um den Suchraum weiter einzuschränken. Daraufhin wird die Suche nach einem neuen Plan erneut begonnen. Wird selbst bei  $Y_{\min}$  kein neuer Plan gefunden oder die vorgegebene, maximale Anzahl an Gesamtiterationen erreicht, so ist der gegenwärtig beste Plan der finale Produktionsplan und die Heuristik somit beendet.

Als Ergebnis dieses Optimierungsproblems geht ein gemäß den Zielgrößen aus (4.1) näherungsweise optimaler Produktionsplan für den Pressenbereich in einem KS-Werk hervor. Dieser stellt den Input der nachfolgenden Produktionsstufe dar: Die für den Härteprozess bereitgestellten Härtewagen mit verschiedenen KS-Sorten. Im anschließenden Abschnitt wird dafür ein simulationsgestütztes Optimierungsverfahren vorgestellt, mit dem die Produktionsziele für diese Fertigungsstufe bestmöglich erreicht werden können. Hierfür ist von Vorteil, dass für die Losgrößenplanung eine Heuristik angewendet wurde. Denn durch die Speicherung aller vorübergehend besten Lösungen kann eine Liste mehrerer sehr guter Lösungen für den Pressenbereich als Input in die Optimierung des Härteprozesses eingehen, um dort eine gesamtheitlich optimale Lösung für die beiden Produktionsstufen zu ermitteln (vgl. Dekompositionsverfahren in Abschnitt 4.1.3).

### 4.3 Simulationsgestützte Optimierung der Autoklavenbeladung

Auch nach der Optimierung der Pressenbelegung sind noch Stellgrößen für die Beeinflussung des weiterführenden Produktionsablaufs vorhanden, die auf die Gesamtzieelerreichung einwirken. Mit den Optimierungsergebnissen für die Pressenbelegung als Input startet die simulationsgestützte Optimierung der Verteilung bereitgestellter Härtewagen gemäß den in Tabelle 12 aufgeführten Freiheitsgraden (s. Abschnitt 4.3.1). Anhand vierer auf die Eigenschaften der Freiheitsgrade zugeschnittener Algorithmen werden Parameterkombinationen gebildet, die anschließend mithilfe der Simulation im dynamischen Kontext bewertet werden (s. Abschnitt 4.3.2). Diese Bewertungen gehen wiederum als Einflussgröße für die Bestimmung der nächsten Parameterkombination in die Algorithmen ein.

### 4.3.1 Optimierungsansätze und Ziele

Im Prozessschritt der Autoklavierung können verschiedene Parameter (s. Tabelle 12) variiert werden, um trotz unveränderlichem Input die Zielgrößen des Härteprozesses zu optimieren. Da diese Freiheitsgrade dynamischen Wechselwirkungen und externen Einflüssen ausgesetzt sind und das Optimierungsproblem aufgrund der zeitlichen Abhängigkeiten eine hohe Komplexität aufweist, ist es nicht zweckgemäß, algorithmische Optimierungsverfahren anzuwenden (vgl. Abschnitt 4.1.1). Demnach wird für die Optimierung dieses Prozessschrittes ein simulationsgestütztes Optimierungsverfahren eingesetzt, das Kategorie D in Bild 19 zuzurechnen ist. Da dieser Kategorie laut VDI-Norm 3633-12 [129] im Regelfall lange Rechenzeiten zuzuschreiben sind, wird bei der Ausgestaltung ein laufzeiteffizientes Verfahren angestrebt.

Die Wechselwirkungen der Freiheitsgrade sind durch die unterschiedlichen Steineigenschaften und thermodynamische Gesetzmäßigkeiten bedingt. Gängige Möglichkeiten der Einflussnahme wurden im Rahmen von Fallstudien identifiziert. So bietet sich prinzipiell eine gemischte oder sortenreine Beladung der Härtekessel an. Die gemischte Zuweisung verlängert einerseits im Mittel die Härtezeit der Kessel, da immer die längste individuelle Härtezeit aller enthaltenen Steinsorten als Verweilzeit gewählt werden muss. Hierdurch werden Kapazitäten blockiert und ein höherer Energieverbrauch je KS verursacht. Andererseits kann die Durchlaufzeit sinken, da die Anlagen schneller bestückt werden. Die Koordination der nachfolgenden Prozesse ist jedoch komplexer, weil ein inhomogener Mix an Produkten zur Verpackungsanlage gelangt. Jedoch wird die erforderliche Anzahl an eingesetzten Autoklaven durch gemischte Ladungen verringert, was positiv auf den Energieverbrauch des Prozessschrittes einwirkt.

Die Eignung einer Beladungsstrategie hängt jedoch ebenso von der Zusammensetzung der ankommenden Härtewagen ab. Bei überwiegender Produktion von Kleinformaten werden zum Beispiel viele Pressenhübe benötigt, um einen Härtewagen mit Rohlingen zu füllen. Hierdurch kommen die Wagen in größeren Zeitabständen an den Wartepositionen an, wodurch die Autoklaven langsamer befüllt werden. Zudem kühlen die Rohlinge stärker aus. Da Kleinformate jedoch eine kürzere Härtedauer besitzen, schließen die Härtekessel ihre Bearbeitung schneller ab. So bleibt ein großer Teil der Anlagenkapazität ungenutzt und für die Dampfüberleitung stehen weniger Alternativen zur Verfügung. Im Gegensatz dazu werden die Autoklaven durch überwiegende Produktion von Großformaten schneller beladen, sind jedoch aufgrund der langen Härtezeit auch länger belegt. So

können im schlechtesten Fall Blockadesituationen entstehen. Veränderungen in der Frischdampf- respektive Überleitgrenze ( $\bar{p}_{E,FDlim}$ ,  $\bar{p}_{S,RElim}$ ) führen zu einer verbesserten Durchlaufzeit auf Kosten einer schlechteren Nutzung des Überleitpotenzials des Dampfsystems und umgekehrt. Dieser Zielkonflikt zwischen Durchsatz und Energieverbrauch stellt auch das zu lösende Dilemma dieses gesamten Prozessschrittes dar.

Eine optimale Kombination der Freiheitsgrade ist ohne IT-Unterstützung folglich nicht zu finden. Demnach ist ein Lösungsverfahren zu implementieren, das unter Variation der Freiheitsgrade die nachfolgende Zielfunktion minimiert:

$$\min \rightarrow \varphi((J_i)_{i \in \mathbb{N}}) = \alpha_1 \cdot \sum_i T_i + \alpha_2 \cdot M + \alpha_3 \cdot E(C_{max}) \quad (4.15)$$

mit

$J_i \hat{=}$  Härteauftrag für Härtewagen i

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \hat{=}$  Gewichtungsfaktoren

$T_i = \max(0, C_i - d_i) \hat{=}$  Überschreitung der Fälligkeitstermine

$C_i \hat{=}$  Fertigstellungszeitpunkt von Härtewagen i

$d_i \hat{=}$  Fälligkeitstermin für Härtewagen i

$M = C_{max} - M_{opt}$

$\hat{=}$  Überschreitung der Gesamtdurchlaufzeit nach dem optimierten Plan

$C_{max} \hat{=}$  Fertigstellungszeitpunkt des letzten Härtewagens  $J_i$

$M_{opt} \hat{=}$  Fertigstellungszeitpunkt nach optimiertem Plan aus Subsystem 1

$E(C_{max}) \hat{=}$  Energieverbrauch für die Autoklavierung aller Härtewagen

Der erste Summand in Gleichung (4.15) bestraft Fertigungstermine, die zu verspäteten Auslieferungen an den Kunden führen, sodass möglichst alle Liefertermine eingehalten werden sollten. Mit dem zweiten Summanden wird beabsichtigt, die bei der Optimierung der Pressenbelegung errechnete Durchlaufzeit auch im dynamischen Kontext bei der Zuweisung der Härtewagen zu den Autoklaven möglichst präzise zu treffen. Zuletzt sorgt der dritte Summand als gegenläufige Zielgröße zu den vorherigen Summanden dafür, dass der gesamte Energieverbrauch für den Planungshorizont, das heißt für alle Härteaufträge  $J_i$ , minimiert wird.

Ist die Zielgröße  $E(C_{max})$  aufgrund unzureichender oder fehlender Berücksichtigung von Energieverbräuchen im Simulationsmodell nicht explizit zu ermitteln, so kann man sie durch repräsentative Funktionen substituieren. Diese beinhalten Einflussgrößen, die maßgeblich auf die Höhe des Energieverbrauchs einwirken. Anstelle des tatsächlichen Energiebedarfs können hier die Wartezeit der Härtewagen zwischen Press- und Härteprozess,

der Anteil der Nutzungsdauer an der gesamten Produktionsdauer, die Anzahl genutzter Autoklaven sowie die gesamte Härtezeit eingesetzt werden. Sie repräsentieren die Abkühlung der Rohlinge und der AK, den Energiebedarf für das Aufwärmen abgekühlter AK und die Energieabhängigkeit von sortenreiner oder gemischter Beladung. Für die exakte Formalisierung und Verwendung im Gesamtmodell sei auf [P5] verwiesen.

Zur geeigneten Gewichtung der Summanden können transitive Indifferenzpaare gebildet werden. Hierzu zieht man je zwei Gewichtungsfaktoren heran und priorisiert deren Zielwertänderungen gegeneinander (z. B. ein um 1,0 MWh höherer Energieverbrauch ist in gleichem Maße negativ anzusehen wie eine Überschreitung der Durchlaufzeit um zwei Stunden). Hierbei gilt es auf Transitivität zu achten, sodass sich die einzelnen Indifferenzpaare in Gegenüberstellung nicht widersprechen.

#### 4.3.2 Lösungsverfahren

Da die Zielgrößen für den Autoklavierungsprozess gegenläufig sind, müssen für die Ermittlung des optimalen Ergebnisses mittels simulationsgestützter Optimierung Simulationsläufe iterativ mit variierenden Freiheitsgraden (z. B. Beladungsstrategie, Anzahl AK) durchgeführt werden. Nach der vorgelagerten Optimierung der Abläufe im Pressprozess (s. Abschnitt 4.2.2) ist einmalig ein Simulationslauf vom Prozessschritt des Pressens bis zur Übergabe der Härtewagen zu den Schiebebühnen durchzuführen. Hierbei werden die frühesten Bereitstellungszeitpunkte der Härtewagen für die Autoklavierung sowie weitere Parameter als Input für Subsystem 2 ermittelt. Diese werden aufgrund der aus dem Gesamtmodell entkoppelten Simulation des Autoklavenbereichs erforderlich, da hierdurch die Restriktionen aus vorgelagerten Prozessschritten nicht eingehen können. Diese Inputparameter, die in Subsystem 2 als Restriktionen fungieren, sind konkret folgende:

- Losgrößen und Rüst dauern, um bei der Simulation in Subsystem 2 nicht von zeitgleichem Rüsten bei zwei Pressen auszugehen.
- Herstellungsdauer jeder Härtewagenladung, um Härtewagen nicht schneller zu Autoklaven zu transportieren, als sie bereitgestellt werden können. Hierfür ist eine Nebenbedingung zu implementieren, die sicherstellt, dass die Wartezeit auf den Transport zu den AK von allen  $n+1$  aufeinanderfolgenden Härtewagen ( $n =$  Puffergröße nach den Pressen) immer so lang ist, wie die Herstellungszeit für die vollständige Beladung des letzten der  $n+1$  Härtewagen.

4 Verfahren zur automatisierten Generierung optimierter Fertigungsabläufe mittels Kopplung von Algorithmen und Simulationsmodellen

Diese Parameter gehen als Input in die abgekoppelte, iterative Simulation der Autoklavierung unter veränderlichen Stellgrößen ein. Bild 62 zeigt das Schema, nach dem dieses simulationsgestützte Optimierungsverfahren abläuft:

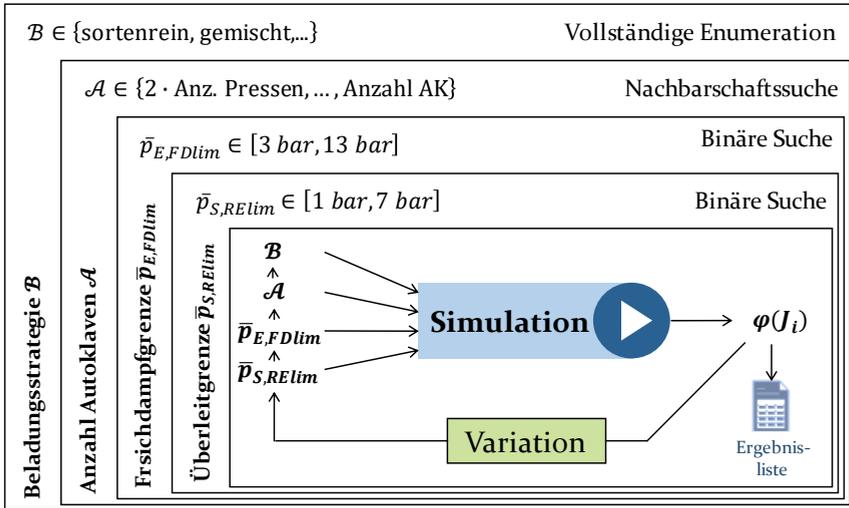


Bild 62: Ablauf des simulationsgestützten Optimierungsverfahrens zur Ermittlung der optimalen Autoklavenzuweisung

Zu Beginn des Lösungsverfahrens werden für alle Freiheitsgrade Rand- oder Mittelwerte des Parameterraums festgelegt, mit denen der erste Simulationslauf gestartet wird. Dieser beschränkt sich durch die Aktivierung zusätzlicher Quellen und Senken auf den Bereich zwischen den Übergabestellen zur Schiebebühne und zum Verpackungsbereich. Der mittels Simulation bestimmte Zielfunktionswert  $\varphi(J_i)$  wird nach Ende des Simulationslaufs in einer Ergebnistabelle aufsteigend sortiert gespeichert. Daraufhin wird anhand der in Bild 62 aufgeführten Suchverfahren ein Freiheitsgrad variiert und die Simulation bis zum Abschluss aller vier Schleifen erneut gestartet.

Als erste Variationsschleife erfolgt die Anpassung der Überleitgrenze  $p_{,im}$  gemäß Algorithmus 1. Die binäre Suche zielt darauf ab, den Bereich möglichst präzise einzugrenzen, in dem der ideale Wert für die Überleitgrenze liegt. Durch kontinuierliches Halbieren des Suchraums und Fortführung der Suche in dem Bereich mit dem im Mittel geringsten Zielfunktionswert kann dies gelingen (s. Bild 63). Nach festgelegter Iterationszahl wird diese Schleife beendet und nach erstmaliger Variation der Frischdampfsgrenze  $p_{,im}$ , was analog in einer binären Suche erfolgt, erneut von vorne gestartet. Zur Bestimmung einer geeigneten Iterationszahl  $i$

kann beispielsweise die Weite des restlichen Suchraums  $|\bar{p}_{S,RElim}^{(i)} - \bar{p}_{S,RElim}^{(i+1)}|$  herangezogen werden. Wenn diese einen bestimmten Druckwert unterschreitet, kann die Schleife beendet werden. Ein Wert von 0,1 bar ist zum Beispiel nach acht Iterationen erreicht.

Algorithmus 1: Binäre Suche zur Bestimmung des optimalen Werts  $\tilde{p}$  für die Überleitgrenze  $\bar{p}_{S,RElim}$

---

Suchraum  $\mathcal{S} := \{p_s^{min}, p_s^{max}\}; p_s^{min} \leftarrow 1 \text{ bar}; p_s^{max} \leftarrow 7 \text{ bar};$  Iterationsgrenze  $Z \leftarrow 0,1 \text{ bar}$   
 $\varphi(J_i)$  mit  $p_s^{min}$  und  $p_s^{max}$  mittels Simulation bestimmen:  $\varphi(p_s^{min}), \varphi(p_s^{max})$   
**While**  $|p_s^{max} - p_s^{min}| > Z$  do  
 $p_s^{neu} \leftarrow \frac{1}{2}(p_s^{max} + p_s^{min});$   $\varphi(p_s^{neu})$  mittels Simulation bestimmen  
 $p_s^{\varphi|min} \leftarrow \arg \min_{p \in \mathcal{S}} \varphi(p)$   
 $p_s^{min} \leftarrow \min\{p_s^{neu}, p_s^{\varphi|min}\}; p_s^{max} \leftarrow \max\{p_s^{neu}, p_s^{\varphi|min}\};$  update  $\mathcal{S}$   
**End while**  
 $\tilde{p} \leftarrow \arg \min_{p \in \mathcal{S}} \varphi(p)$

---

Als nächster Variationsschritt wird der Wert der maximal eingesetzten Autoklaven angepasst. Die Richtung der Anpassung sowie die Abbruchbedingung gehen aus Algorithmus 2 hervor. Die Iterationen werden in der Mitte des Suchraums begonnen und mit den beiden direkten Nachbarwerten fortgeführt. Sobald ein Wert  $\mathcal{A}$  einen minimalen Zielfunktionswert aufweist, der von je zwei Nachbarn nicht unterschritten wird, kann die Schleife beendet werden. Ein Suchverfahren in dieser Form ist im vorliegenden Fall gerechtfertigt, da aufgrund der direkten Beeinflussung von Energieverbrauch und Durchlaufzeit von weitläufigen lokalen Minima nicht auszugehen ist.

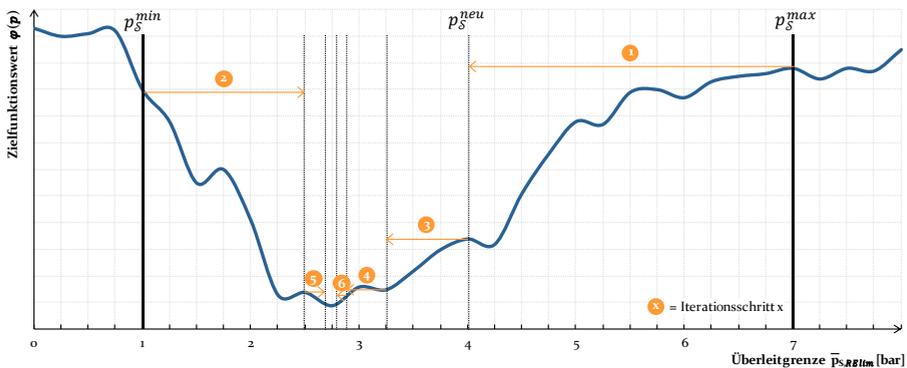


Bild 63: Exemplarischer Suchverlauf von Algorithmus 1 zur Bestimmung der optimalen Überleitgrenze

Als letzte Variation ist die Anpassung der Beladungsstrategie  $\mathcal{B}$  vorgesehen. Die Standardvarianten sind hier die sortenreine sowie die gemischte Beladung. Aber auch weitere Strategien, wie eine gemischte Beladung nur für einen beschleunigten Anlauf zu Beginn der Woche oder nur bei identischer Härtekurve aller enthaltenen KS-Sorten, sind einfach zu untersuchen. Sie sind lediglich in der Simulation zu implementieren und im Suchraum des Algorithmus zu ergänzen. Um Rechenzeit zu sparen, sollte die Iteration stets mit der sortenreinen Beladung beginnen. Denn bei gemischter Beladung sind nie mehr eingesetzte AK als im Idealfall bei sortenreiner Beschickung zielführend, da dann sowohl die Durchlaufzeit als auch der Energiebedarf höher ausfällt. Demnach kann der Suchraum initial mit der optimalen Anzahl an AK bei sortenreiner Beschickung nach oben begrenzt werden.

Algorithmus 2: Nachbarschaftssuche zur Bestimmung des optimalen Werts  $\tilde{\mathcal{A}}$  für die Anzahl einzusetzender Autoklaven

---

Suchraum  $A := \{a_1, a_1 + 1, \dots, a_n\}$ ;  $a_1 =$  Anzahl Pressen;  $a_n =$  Anzahl Autoklaven  
 $k \leftarrow \left\lfloor \frac{a_1 + a_n}{2} \right\rfloor$ ;  $\varphi(l) \leftarrow -\infty \quad \forall l \in A$ ;  $A \leftarrow A \setminus \{k\}$   
 $\varphi(J_i)$  für maximal  $k$  Autoklaven mittels Simulation bestimmen:  $\varphi(k)$   
**Do until**  $\min\{\varphi(l) \mid l \in \{k - 2, k - 1, k, k + 1, k + 2\}\} = \varphi(k)$  **loop**  
 $k^* \leftarrow \arg \min_{l \in A} |l - k|$ ;  $\varphi(k^*)$  mittels Simulation bestimmen;  $A \leftarrow A \setminus \{k^*\}$   
**If**  $\varphi(k^*) \leq \varphi(k)$  **then**  
 $k \leftarrow k^*$   
**End If**  
**End**  
 $\tilde{\mathcal{A}} \leftarrow k$

---

Nach Durchlauf aller vier Iterationsschleifen wird die aufsteigend nach Zielfunktionswert sortierte Ergebnisliste als Input an die Verpackung (Subsystem 3) übergeben. Das dort eingesetzte Verfahren wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert. Die Anzahl an Simulationsläufen bei drei Pressen, 15 Autoklaven und 0,1 bar als Iterationsgrenze bei den binären Suchen beträgt maximal 1.440 und mindestens 720. Eine Laufzeiteinsparung ist realisierbar, wenn die optimale Überleit- und Frischdampfgränze nicht algorithmisch untersucht werden soll, da sie beispielsweise im Steuerungssystem nicht variierbar ist. Dann erreicht man im schlechtesten Fall eine Iterationszahl von zehn.

## 4.4 Zielgerechte Anpassung der initialen und abschließenden Produktionsstufen an die optimierten Hauptprozesse

Sowohl die Verpackung als auch die Mischerei stellen Prozessschritte dar, die im Verhältnis zum Press- und Härteprozess wenig Optimierungspotenzial besitzen. Demnach werden sie als letzte Subsysteme restringiert durch die Ergebnisse aus den ersten beiden Teilproblemen optimiert. Lediglich im Falle einer Unmöglichkeit der Lösungsfindung unter Einhaltung der Restriktionen werden hieraus weitere Iterationsschleifen für die ersten beiden Subsysteme ausgelöst.

### 4.4.1 Kapazitätsprüfung für den Verpackungsbereich

Organisatorische Maßnahmen zur Optimierung der Abläufe im Verpackungsbereich (Subsystem 3) sind nur in geringem Maße möglich. Dennoch lässt sich bei Vorliegen zweier Verpackungslinien dank der Vorausschau auf die ankommenden Härtewagen ermitteln, wie diese auf die Verpackungslinien zu verteilen sind, um einen effizienten Durchlauf aller Steine zu erreichen. Zudem ist es möglich, sofern die Verpackung den Engpass im Gesamtprozess darstellt, eine Pull-Steuerung (s. Tabelle 12) ausgehend vom Durchsatz der Verpackungsanlage einzurichten. Hierzu ist jedoch bei Fehlen einer Entkopplungsmöglichkeit ein Eingriff in die Härteprozesssteuerung nötig, um die KS zum erforderlichen Zeitpunkt bereitstellen zu können. Dies würde eine vollständig andere Ablauflogik der PPS erfordern und kommt in den meisten Werken nicht in Betracht.

Sofern eine Optimierung der Abläufe im Verpackungsbereich nicht von Belang ist, muss in Subsystem 3 nur mittels Vorausschau sichergestellt werden, dass vorhergehende Prozesse nicht durch einen Engpass in der Verpackung retrograd beeinträchtigt werden. Dies ist denkbar, da die Abläufe bei der Härtung in der vorangegangenen Optimierungsphase ohne Kapazitätsrestriktionen der nachfolgenden Prozessschritte geplant wurden. Das empfohlene Vorgehen ist in Bild 64 dargestellt.

Sollte bei autonomer Simulation von Subsystem 3 mit den Inputdaten aus Subsystem 2 ein Engpass auftreten, werden beide Subsysteme erneut gemeinsam simuliert. Denn möglicherweise wirken sich die identifizierten Engpässe in der Verpackung nicht negativ auf den vorangegangenen Prozessschritt aus. Wenn dies doch der Fall ist, werden die Ergebnislisten weiter abgearbeitet, bis eine engpassfreie Lösung gefunden ist.

#### 4 Verfahren zur automatisierten Generierung optimierter Fertigungsabläufe mittels Kopplung von Algorithmen und Simulationsmodellen

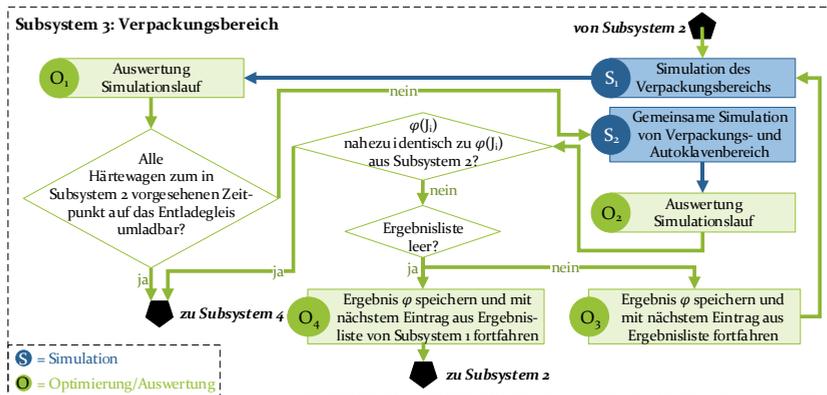


Bild 64: Methodik zur Identifizierung einer Optimallösung in Subsystem 3

Sollte keine Alternative der Autoklavenbeschickung zu einer engpassfreien Lösung in der Verpackung führen, wird mit dem nächstbesten Auftragsmix aus Subsystem 1 fortgefahren. Andernfalls geht die Ergebnisliste über zu Subsystem 4, der im nachfolgenden Abschnitt erläuterten Rückwärtsterminierung der Mischaufträge.

#### 4.4.2 Rückwärtsterminierung der Mischaufträge

Um die bei der exothermen Reaktion zwischen Branntkalk und Wasser nach deren Mischung freigesetzte Wärme in möglichst geringem Umfang an die Umgebung abzugeben, ist das Material zum spätest möglichen Zeitpunkt vor dessen Weiterverarbeitung zu mischen (Subsystem 4). Als geeignetes Instrument erweist sich hierfür die Rückwärtsterminierung, die in Bild 65 der üblichen Vorwärtsterminierung gegenübergestellt ist und eine geringere Verschwendung aufweist. Eine Vorwärtsterminierung liegt auch vor, wenn Material stets bei Unterschreiten eines bestimmten Füllstands im Reaktor angefordert wird.

Als Input dieser Optimierungsphase liegen die simulierten Zeitpunkte der Pressenhübe an den einzelnen Pressen aus Subsystem 1 vor, aus denen der jeweilige Materialverbrauch abgeleitet werden kann (= simulationsgestützte Optimierung gemäß Kategorie B aus Bild 19, Seite 43). Bei gegebenen Chargengrößen für den Mischer lassen sich hieraus in Verbindung mit der Bearbeitungs- und Reaktionszeit die spätest möglichen Startzeitpunkte für die Mischaufträge ermitteln. Sollten sich Überschneidungen in den Bearbeitungszeiträumen (= Mischvorgänge) ergeben, sind diese entsprechend weiter in die Vergangenheit zu verschieben. Als Chargengröße kann eine Materialmenge gewählt werden, die den Mischer am optimalen Be-

triebspunkt arbeiten lässt. Aufgrund des zeitlichen Mehraufwands ist es allerdings möglich, dass die Stromeinsparungen beim Mischer durch den Temperaturverlust des Gemischs im Vergleich zur Verwendung der maximalen Chargengröße überkompensiert werden. Ob dies der Fall ist, kann mit dem Vorgehen gemäß Kategorie A aus Bild 19 (Seite 43) simulativ ermittelt werden.

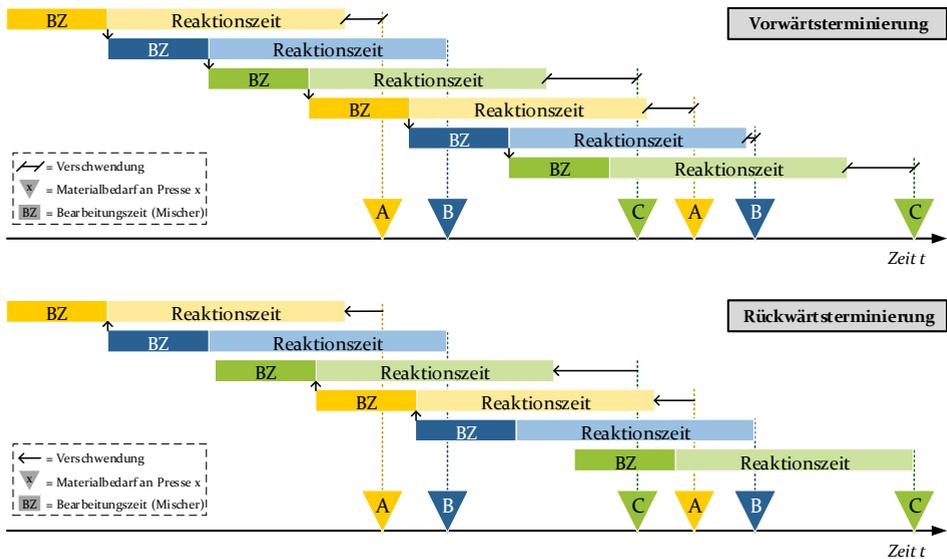


Bild 65: Gegenüberstellung von Rückwärts- und Vorwärtsterminierung der Mischaufträge

Sollte keine valide Terminierung der Mischaufträge möglich sein, stellt der Mischerbereich einen Engpass dar, der die Planung für die nachfolgenden Prozessschritte beeinträchtigt. Somit sind die optimierten Abläufe für Subsystem 2 und 3 nicht realisierbar und daher in einer Rekursion alternative Abläufe (nächstbeste Einträge der Ergebnisliste) für diese Subsysteme zu untersuchen. Ergibt sich jedoch eine gültige Lösung, so ist eine erste sehr gute Lösung des Gesamtproblems gefunden. Es empfiehlt sich jedoch die Untersuchung weiterer alternativer Auftragsmixe an den Pressen, die zwar zu einer leicht schlechteren Zielerreichung im Pressenbereich führen, aber möglicherweise einen effizienteren Ablauf der nachfolgenden Prozessschritte ermöglichen. Eine andere Zielfunktion als  $\varphi(J_i)$  aus Subsystem 2 ist für die Bewertung der Gesamtlösung nicht erforderlich, da der Härteprozess den Engpass mit dem höchsten Ressourceneinsparpotenzial im Gesamtprozess darstellt. Die Optimierungsanforderungen und Restriktionen des Pressenbereichs sind über die Priorisierung der Ergebnisse aus Subsystem 1 bei deren Übergabe sowie durch Integration des Summanden zur Überschreitung der Fälligkeitstermine in  $\varphi(J_i)$  bereits berücksichtigt.



## **5 Methodik zur ressourceneffizienten Regelung der Produktionsprozesse durch betriebsbegleitende simulationsgestützte Optimierung**

Für den Einsatz der simulationsgestützten Optimierung bei sehr kurzfristigen Problemstellungen und somit für die optimierte Regelung der Fertigungsabläufe bei Planabweichungen ist von entscheidender Bedeutung, dass die Unterstützungssysteme stets auf dem momentanen Zustand der Produktion aufsetzen. Hierfür ist die Anbindung an aktuelle Produktionsdaten ein elementarer Bestandteil. Von gleicher Relevanz ist eine Methodik, die beschreibt, wie die KS-Fertigung unter Einsatz der Hilfsmittel Simulation und Optimierungsverfahren proaktiv geregelt werden kann, um trotz eintretender, unvorhergesehener Ereignisse die Produktionsziele bestmöglich zu erreichen. So sind intern (z. B. Maschinenausfälle, Qualitätsprobleme) wie auch extern ausgelöste Veränderungen (z. B. Zusatzaufträge) automatisiert und reaktionsschnell zu erfassen, zu bewerten und geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Eine hierfür geeignete Methodik unter Einbezug der in den vorherigen Kapiteln entwickelten Simulations- und Optimierungsverfahren wird in Abschnitt 5.1 hergeleitet. Dieser liegt die Verfügbarkeit von Echtzeitdaten aus der Fertigung zugrunde. Aus diesem Grund widmet sich Abschnitt 5.2 der Entwicklung eines geeigneten Vorgehens zur Ermittlung und Erfassung der erforderlichen Daten sowie deren Bereitstellung für übergeordnete IT-Systeme. Zur Implementierung eines entsprechenden Entscheidungsunterstützungssystems (*KS-Cockpit*) zeigt der abschließende Abschnitt 5.3 eine geeignete Aufbaustruktur und Ablauflogik auf.

Teile der Ausführungen in den nachfolgenden Abschnitten sowie von deren Umsetzung in Abschnitt 6.3 sind an den vom Autor am Lehrstuhl FAPS co-betreuten studentischen Arbeiten [S4-S6, S13, S14, S27, S50, S51] angelehnt. Einzelne Aspekte wurden vom Autor in [P5, P6, P13, P14] der internationalen Fachwelt zugänglich gemacht.

## **5.1 Regelungsmethodik zur vorausschauenden Reaktion auf Planabweichungen**

Die nachfolgend vorgestellte Methodik soll auf kurz- bis mittelfristige Planungshorizonte ausgelegt sein und keine Anpassungen des Produktionssystems selbst erfordern, sondern die Abläufe im bestehenden System durch Umplanung (*Rescheduling*) optimieren. Um eine ausreichende Planstabilität sicherzustellen, findet eine Umplanung nur statt, wenn daraus eine signifikante Verbesserung im Vergleich zur Verfolgung des aktuellen Plans resultiert. Zur Sicherstellung der rechtzeitigen Identifizierung von kritischen Planabweichungen, wird der Produktionsplan spätestens in periodischen Abständen, jedoch jederzeit bei Auftreten ungeplanter Ereignisse simulativ auf eine erforderliche Umplanung hin überprüft. Die Simulation wird hierbei neben der vorausschauenden Bewertung der Auswirkungen von Planabweichungen auch als Voraussimulation (vgl. Abschnitt 5.1.3) zur Überbrückung des für die Optimierungsberechnungen erforderlichen Zeitraums eingesetzt.

### **5.1.1 Ablauf der Fertigungsregelung auf Basis betriebsbegleitender simulationsgestützter Optimierung**

Im ersten Schritt wird ein Ablaufkonzept dargestellt, das ein auf betriebsbegleitender Simulation und integrierten Optimierungsalgorithmen basierendes Unterstützungstool beschreibt. Dieses greift bei eingetretenen und absehbaren Planabweichungen regelnd ein, indem es die Fertigungsabläufe unter Beachtung der neuen Rahmenbedingungen optimiert. Hiervon leiten sich die Anforderungen an den Aufbau sowie die erforderlichen Funktionalitäten im KS-Cockpit ab, die darauffolgend erläutert werden.

Zur besseren Einordnung lässt sich die Methodik nach dem Schema von VIEIRA ET AL. kategorisieren, was in Tabelle 2 (Seite 33) durch farbliche Hervorhebung kenntlich gemacht ist. Eine Einsetzbarkeit in einem statischen Auftragsumfeld ist aufgrund der je Planungsperiode vorab festgelegten Produktionsmengen ausreichend, wobei dieses durch Eilaufträge und Mengen- oder Formatänderungen stochastischen Schwankungen unterliegt. Unter Verfolgung einer prädiktiv-reaktiven Optimierungsstrategie, die sowohl ereignisbasiert (s. Abschnitt 5.1.2) als auch spätestens in festen Zeitabständen periodisch ausgelöst wird, wird das Rescheduling ausgeführt. Die Kombination dieser beiden Auslöser unter Zuhilfenahme der Simulation gleicht deren individuelle Nachteile durch Synergieeffekte aus (vgl. Bild 66).

Ereignisbasierte Optimierung		Periodische Optimierung		
Direkte Berücksichtigung von Planabweichungen		Hohe Planstabilität		<span style="color: green;">■</span> = Vorteil <span style="color: orange;">■</span> = Nachteil
Geringe Planstabilität		Vernachlässigung kritischer Planabweichungen		
Hybride Optimierung		Simulation		
Zuverlässige Berücksichtigung von Planabweichungen und hohe Reaktivität		Aufwand für die Ermittlung kritischer Planabweichungen und geringe Planstabilität		
		Schnelle Ermittlung der Auswirkungen von Planabweichungen		
Prädiktiv-reaktives, simulationsgestütztes Optimierungstool				
Hohe Planstabilität und hohe Reaktivität		Geringer Aufwand für die Ermittlung kritischer Ereignisse		

Bild 66: Eliminierung der Nachteile gängiger Rescheduling-Ansätze durch Integration von Simulationsverfahren

Dieser Ansatz setzt auf den Erkenntnissen des von CHURCH/UZSOY [293] entwickelten „event-based Rescheduling“ auf. So wird grundsätzlich in festen Zeitabständen der aktuelle Plan auf eine Verbesserung durch alternative Abläufe überprüft. Nur bei signifikantem Optimierungspotenzial wird eine Umplanung vorgenommen. Zusätzlich wird zwischen diesen periodischen Optimierungspunkten ein Rescheduling geprüft, wenn Ereignisse eintreten, die Einfluss auf die Zielerreichung nehmen könnten. Entscheidend ist hierbei, dass das Optimierungstool zwischen kritischen und unkritischen Ereignissen unterscheiden kann. Dies wird durch die Verwendung der Simulation als Tool zur Wirkungsermittlung ermöglicht (s. Abschnitt 5.1.2), was die Erstellung komplexer Modelle vermeiden lässt. Wie im periodischen Fall wird ein Rescheduling auch geprüft, wenn ein Störfall behoben wurde, der zu einer Umplanung geführt hatte.

Das in Bild 67 dargestellte Fallbeispiel soll die geschilderte Funktionsweise im Zusammenspiel der einzelnen Komponenten erläutern. Die einzigen Ereignisse, die hierbei zu einer Umplanung führen, ereignen sich zwischen den Zeitpunkten  $t = 2$  und  $t = 4$ . Zum Zeitpunkt  $t = 2$  wird ein periodisch aufgerufener Optimierungslauf gestartet. Zunächst ermittelt die Simulation auf Basis der zwischenzeitlich eingetretenen Änderungen im Produktionsverlauf dessen weiteren Fortlauf in der Zukunft (s. Abschnitt 5.1.2). Hierbei wird festgestellt, dass das Zielfunktionsergebnis außerhalb der festgelegten Grenzen liegen wird. Vor dem Start der simulationsgestützten Optimierung dient die Voraussimulation des Produktionsgeschehens unter Einwirkung der Planabweichungen als Voraussetzung für die Überbrückung der Optimierungsdauer (s. Abschnitt 5.1.3). Da während der Ausführung der Optimierung die KS-Produktion voranschreitet, muss der Aus-

gangspunkt aller Optimierungen auf dem künftig vorliegenden Produktionsstand nach Abschluss der Optimierung basieren, um Inkonsistenzen bei der Planübernahme zu vermeiden.

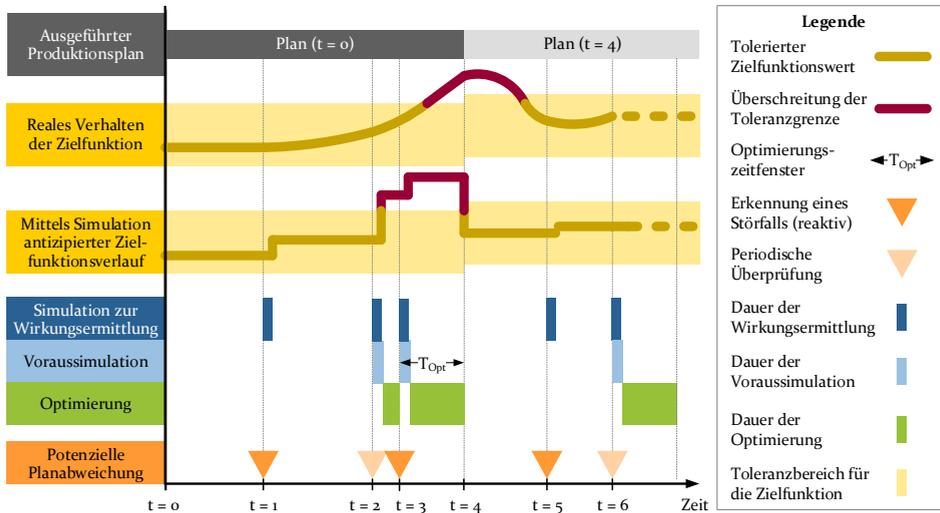


Bild 67: Periodisch-reaktiver Einsatz von Simulations- und Optimierungsverfahren zum vorausschauenden Entgegenwirken bei Planabweichungen (i. A. a. [P6])

Der erste Optimierungslauf wird im Fallbeispiel abgebrochen, da in der Zwischenzeit ( $t = 3$ ) eine weitere Planabweichung eintritt, die in die Voraussimulation und insbesondere in die Optimierung einbezogen werden muss. Um nicht in einem kontinuierlichen Optimierungsstatus zu verharren, ist eine maximal gestattete Abbruchzahl vorab festzulegen. Da die Optimierung einen Zielfunktionswert ergibt, der nicht nur minimal besser ist (= Überschreitung der vorgegebenen Toleranzgrenze), als er es bei Fortsetzung der Produktion nach den Planabweichungen wäre, wird die Umplanung vorgenommen. Alle anderen Planabweichungen führen nicht zu einem Verlassen des zulässigen Bereichs durch die Zielfunktion respektive zu keiner wesentlichen Verbesserung, sodass daraufhin in Anbetracht der Planstabilität keine Umplanung vorgenommen wird.

Ziel des hybriden Optimierungsverfahrens ist es demnach, nur dann umzuplanen, wenn dies zu einer relevanten Verbesserung der Planung führt. Für die Umsetzung der Methodik (s. Abschnitt 5.3) werden diverse individuelle Anforderungen an die dort zusammenwirkenden Module gestellt, die in Tabelle 15 herausgestellt sind.

Tabelle 15: Umsetzungsanforderungen an die einzelnen Komponenten des KS-Cockpit

Simulation	Optimierung	Monitoring	Benutzer
Betriebsbegleitender Einsatz	Modular integrierbare Algorithmen	Detektion von Planabweichungen	Berücksichtigung als Entscheidungsträger
Kurze Laufzeit	Unmittelbar umsetzbare Ergebnisse	Abschätzung der Auswirkungen	Einfache Bedienung
Geeigneter Detailgrad	Kurze Rechenzeit	Initialisierung des Reschedulings	Entscheidungsunterstützung
Einfache Konfiguration und Anpassung	Periodischer und reaktiver Einsatz		

### 5.1.2 Identifizierung kritischer Planabweichungen

Um das Rescheduling nur bei kritischen Planabweichungen einzuleiten, ist ein Verfahren erforderlich, das eingetretene Ereignisse in Bezug auf deren Wirkung auf die Fertigungsabläufe bewertet. Üblicherweise werden hierfür mathematische Modelle entworfen, die die Auswirkungen in Form von zusätzlichen Kapazitätsbedarfen, Kosten oder Energiebedarfen quantifizieren. Realistischere Ergebnisse liefert der Einsatz von DES, der sich insbesondere bei einem bereits vorliegenden Simulationsmodell rechtfertigt. Als Voraussetzung ist hierfür ein Echtzeitabbild des Produktionszustands im DES-Modell erforderlich (s. Abschnitt 5.2). Zudem ist eine spezifische Behandlung in Abhängigkeit des Ereignistyps vorzusehen. Folgende Typen werden unterschieden:

- (a) Plötzlicher, unvorhergesehener Störfall oder Eingriff in den Produktionsablauf
- (b) Durch Condition Monitoring absehbarer Maschinenstillstand
- (c) Planabweichungen durch Änderung unbeobachteter Produktionsparameter

Für die Berücksichtigung von Fall (a) im KS-Cockpit sind die Planungsabweichungen nach dem von AYTUNG ET AL. [294] entwickelten Konzept in Ursache, Kontext und Wirkung zu kategorisieren. Die Ursachen sind in Anlehnung an NEUHAUS [295] in Auftrags-/Mengenabweichungen (z. B. Änderung Auftragsmenge, Eil-/Zusatzauftrag), technische Abweichungen (z. B. Ausfall bzw. Leistungsverringerung von Komponenten) und Rohstoffabweichungen (z. B. Mangel, Qualitätsproblem) zu untergliedern. Sind die anlagenspezifischen Ursachen festgelegt und auch die identifizierenden Parameter (Wert, ab dem von einer Abweichung ausgegangen wird) eingestellt, ist der Ereigniskontext zu definieren. Dieser gibt an, worauf eine Abweichung im Produktionsablauf Einfluss nimmt. Eine ausgefallene

Schiebebühne ist beispielsweise nicht mehr für den Transport verfügbar und blockiert gegebenenfalls eine weitere Bühne im selben Kanal. Es sind demnach für jede Ursache die Kontexteigenschaften Menge, Ort (außer Auftragsabweichung) und Zeitdauer festzulegen. Zur Wirkungsanalyse sind Ursache und Kontext zusammenzuführen. Dies geschieht im Simulationsmodell, indem für jede Ursache der zugeordnete Kontext in betroffenen Bausteinen oder Methoden als zusätzliches Abweichungsmodul implementiert wird. Dieses ruft die individuelle Abweichungsinformation bei Auftreten aus dem Production Monitoring (s. Bild 83) ab und verändert im angegebenen Zeitraum entsprechend das Simulationsverhalten.

Fall (b) baut auf der zuvor erläuterten Methodik auf. Der Unterschied besteht darin, dass Abweichungen im Simulationsmodell berücksichtigt werden, die noch nicht eingetreten sind. Durch Verknüpfung von Instandhaltungssystemen (s. Abschnitt 2.4.4) mit dem KS-Cockpit können Ausfälle mit Startzeitpunkt und Dauer an das DES-Modell übertragen und in die Optimierungsläufe einbezogen werden.

In Fall (c) kommt der periodische Einsatz der Simulation zur Prüfung des Reschedulingbedarfs zum Tragen. Hierdurch wird eine hohe Überwachungsgüte auch ohne Berücksichtigung jeder Ursache gewährleistet. Durch das kontinuierliche Prüfen auf Abweichungen durch die Simulation zur Wirkungsermittlung (s. Bild 67) wird festgestellt, wenn Abweichungen vorliegen, die durch Parameter ausgelöst werden, die im Production Monitoring nicht explizit überwacht werden (z. B. Anpassung des Presentakts durch Mitarbeiter, manuelle Bedienung der Schiebebühnen). Hierzu wird eine Akzeptanzschwelle für die Zielfunktion der simulationsgestützten Optimierung (s. Formel (4.15)) in Abhängigkeit des Planungshorizonts festgelegt. Wird eine Überschreitung dieser Schwelle bei der simulativen Wirkungsermittlung festgestellt, so werden die Optimierungsläufe (s. Abschnitt 5.1.4) initiiert.

### **5.1.3 Voraussimulation zur Initialisierung des Optimierungsmodells mit künftig vorliegenden Produktionszuständen**

Für den Erhalt präziser Ergebnisse für kurzfristige Planungszyklen ist die Voraussimulation eine essentielle Komponente des reaktiven Optimierungsverfahrens. Sie dient dazu, den Zustand des Produktionssystems vorherzusagen, der vorherrschen wird, wenn die Optimierungsergebnisse errechnet sind. Dieser Zustand geht als Input in das Optimierungsverfahren ein und stellt so sicher, dass das Optimierungsergebnis detailgenau auf den

Status der Produktion zugeschnitten ist und demnach unmittelbar umgesetzt werden kann.

Die Wirkweise der Voraussimulation wird anhand der Gegenüberstellung in dem in Bild 68 visualisierten Fallbeispiel für eine KS-Pressen erläutert. Setzt die Optimierung ohne Voraussimulation auf dem aktuellen Produktionszustand auf, so werden Aufträge eingeplant, die zum Zeitpunkt des Vorliegens eines Ergebnisses bereits abgeschlossen sind. Entsprechend verfälscht sind auch die in Folge eingeplanten Aufträge. Dies kann durch Verwendung der Voraussimulation vermieden werden, da sie das Verhalten der Auftragsbearbeitung während des Optimierungszeitraums im Voraus aufzeichnet und es so in den Optimierungsvorgang einbeziehen kann. Zwischen dem Start- und Endzeitpunkt des Algorithmus liegt somit eine „Frozen Zone“, die nicht optimiert, sondern nur simuliert wird.

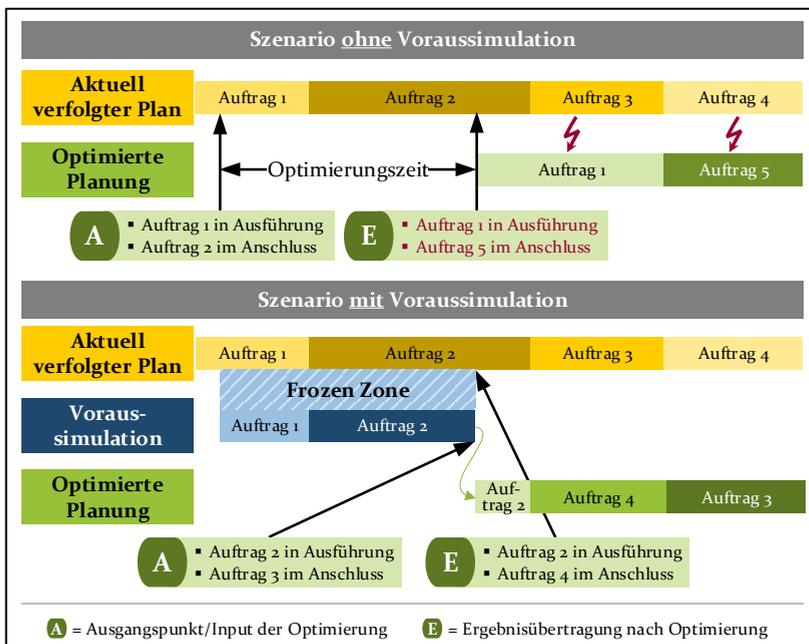


Bild 68: Nutzen der Voraussimulation illustriert anhand eines Fallbeispiels

Die Länge der Frozen Zone, also der Zeitraum, den die Voraussimulation überbrücken muss, ist a priori nicht exakt bestimmbar. Zur Abschätzung wird daher eine selbstadaptive Methodik implementiert, die die Länge der Frozen Zone mit Formel (5.5.1) auf Basis der bereits durchgeführten Optimierungsläufe berechnet. Als Initialwert wird  $T_{VS,WC}$  mit einer Zeit belegt, in der die Optimierung in jedem Fall abgeschlossen sein wird. Mit zuneh-

menden Optimierungsläufen kann die benötigte Zeit  $T_{VS}$  präziser abgeschätzt werden, indem sich  $T_{VS,WC}$  über Hinzunahme des Mittelwerts aller Optimierungsdauern der realen Rechenzeit weiter angleicht. Über den Sicherheitsfaktor  $\mu$  werden Ausreißer in der Optimierungsdauer abgefangen. Beginnend bei  $\mu = 0$  erhöht sich dieser um den Wert 1 bei jeder Überschreitung von  $T_{VS}$  durch die reale Optimierungsdauer.

$$T_{VS} = \frac{T_{VS,WC} + \sum_{i=1}^n T_{Opt,real\ i}}{n + 1} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{n}\right) \quad (5.5.1)$$

mit

$T_{VS} \hat{=}$  Zeitdauer der Voraussimulation

$T_{VS,WC} \hat{=}$  Worst-Case-Wert für die Dauer der Voraussimulation

$T_{Opt,real\ i} \hat{=}$  Tatsächliche Optimierungsdauer des Optimierungslaufs  $i$

$n \hat{=}$  Anzahl der abgeschlossenen Optimierungsläufe

$\mu \hat{=}$  Sicherheitsfaktor

Das durch die Voraussimulation zu überbrückende Zeitfenster kann somit dynamisch berechnet werden. Im Regelfall kann das Ergebnis der Voraussimulation bereits aus der Simulation zur Wirkungsanalyse (vgl. Bild 67) entnommen werden. Hierzu ist der aktuelle Stand der dortigen Simulation zum Zeitpunkt  $T_{VS}$  der simulierten Zeit abzuspeichern, um in Folge als Input für die Optimierungsläufe zu fungieren.

#### 5.1.4 Optimierung, Bewertung und regelnder Eingriff auf die Fertigungsabläufe

Sobald eine eintretende oder absehbare Planabweichung als kritisch identifiziert (s. Abschnitt 5.1.2) oder die periodische Überprüfung auf eine erzielbare Planverbesserung eingeleitet wird (s. Bild 67), startet die simulationsgestützte Optimierung (s. Bild 69). Als Einstieg erfolgt stets ein Simulationslauf zur Wirkungsermittlung, um

1. den Fortlauf der Produktion mit dem ursprünglich geplanten Ablauf  $\hat{\phi}_{Pl}$  zu vergleichen (Überprüfung auf kritische Planabweichung) und/oder
2. einen Referenz-Zielfunktionswert  $\hat{\phi}_{WE}$  zu ermitteln, der mit der späteren Optimallösung  $\hat{\phi}_{SO}$  verglichen wird, um nur bei signifikanter Verbesserung umzuplanen.

Dieser Lauf fungiert gleichzeitig als Voraussimulation, indem zu dem nach Formel (5.5.1) errechneten Zeitpunkt der Simulationsstand abgespeichert wird, um als Input für die Optimierungsläufe zu dienen. Das DES-Modell muss in beiden Fällen mithilfe des digitalen Schattens der realen Produk-

tion mit deren gegenwärtigen Zustand initialisiert werden (s. hierzu Abschnitt 5.2), um eine Vorausschau für den Zeitpunkt der Beendigung der Optimierung zu errechnen.

Die Optimierung selbst läuft nach den in Kapitel 4 erörterten Verfahren simulationsgestützt ab. Hierbei können Feinjustierungen bezüglich der Parametrierung, z. B. der optimierten Subsysteme, Iterationsschleifen oder berücksichtigten Freiheitsgrade, vorgenommen werden. Die in Formel (5.5.1) abgeschätzte Optimierungsdauer ist entsprechend individuell in Abhängigkeit dieser Parametrierung zu errechnen. Zu berücksichtigen sind bei der Optimierung starre Rahmenbedingungen, wie Werkzeugverschleiß und Personalplanung, die aufgrund des aktuell verfolgten Produktionsplans feste Vorgaben darstellen.

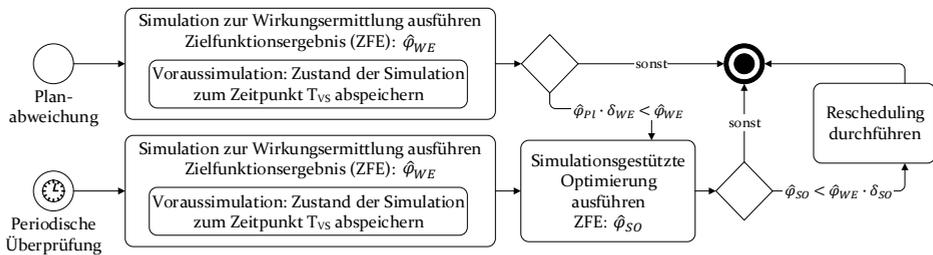


Bild 69: Entscheidungskriterien für die Durchführung des Reschedulings

Analog zur Bestimmung kritischer Planabweichungen, wozu vor Eintreten der Abweichung ein um Faktor  $\delta_{WE} > 1$  besserer Zielfunktionswert erzielbar sein muss, wird für die Optimierung festgelegt, ab welcher Verbesserung ein Optimierungsergebnis zu einer Umplanung führt (s. Bild 69). Hier ist ein um Faktor  $\delta_{SO} < 1$  besserer Zielfunktionswert als bei weiterer Verfolgung der Ursprungsplanung erforderlich. Diese  $\delta$ -Werte sind in Abhängigkeit der Länge des Planungszeitraums einzustellen. In letzter Instanz obliegt die Entscheidung bezüglich der Umplanung dennoch dem Anwender des KS-Cockpit. So ist sichergestellt, dass die Entscheidungskompetenz des Menschen zur Unterstützung des Optimierungssystems einbezogen wird. Jedoch ist das KS-Cockpit auch in der Lage, die Produktion autonom zu regeln, indem notwendige Entscheidungsparameter vorab eingestellt werden.

Der Transfer der Optimierungsergebnisse in die Produktion kann über verschiedene Ebenen der klassischen Automatisierungspyramide (vgl. Bild 26, Seite 56) erfolgen. Neben dem PPS- respektive MES-System auf der Planungs- und Betriebsleitebene bietet sich die Einspeisung der Ausführungsaufgaben direkt in die SPS an. Diese direkte Adressierung der ausführenden

Systeme entspricht den Prämissen der Industrie 4.0 und ermöglicht den Einsatz der simulationsgestützten Optimierung auch in KS-Werken, die nicht mit einem zentralen Leitreechner oder MES-System ausgestattet sind. Die erforderlichen Schritte vom Erhalt des Optimierungsergebnisses bis zu dessen Umsetzung ist in Bild 70 exemplarisch unter Einsatz des OPC-UA-Kommunikationsprotokolls visualisiert. Die zugehörige Implementierung wird in Abschnitt 5.2.2 erläutert. Besonders die Umwandlung der Optimierungsergebnisse in Steuerungsanweisungen ist, analog zur Abbildung des aktuellen Zustands aus Produktionsdaten in der Simulation (s. Abschnitt 5.2.1), ohne Einsatz einer semantischen Datenschnittstelle mit einer Vielzahl individueller Verknüpfungen verbunden.

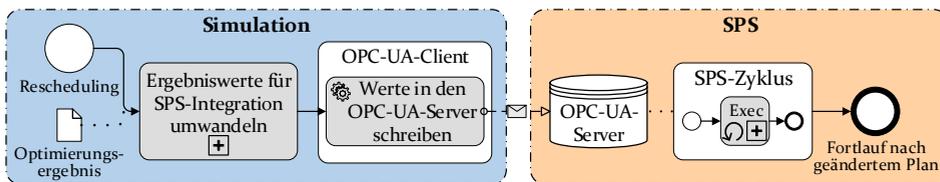


Bild 70: Direkter Eingriff auf den SPS-Ablauf aus der Simulation über OPC UA

## 5.2 Echtzeitnahe digitale Abbildung der Produktion durch Integration relevanter Betriebs- und Maschinendaten

Die Einrichtung eines produktionsynchronen digitalen Zwillings der KS-Herstellung, der mithilfe der Simulation aufsetzend auf dem momentanen Produktionsstand Szenarien für dessen weiteren Verlauf untersuchen kann, erfordert eine Integration des aktuellen, realen Systemzustands (digitaler Schatten) in das DES-Modell. Nach dem in Bild 71 geschilderten Vorgehen sind zunächst die für ein Echtzeitabbild in der Simulation erforderlichen Daten zu identifizieren, bevor eine geeignete technische Anbindung umgesetzt werden kann. Sind die Daten schließlich bereitgestellt, so sind sie an den zugehörigen Stellen im DES-Modell zu implementieren.

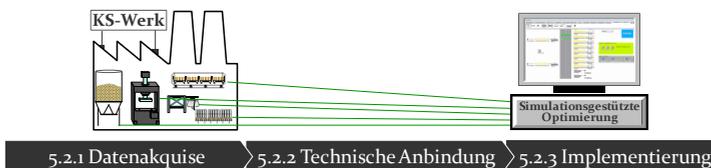


Bild 71: Konzept zur Erweiterung der Materialflusssimulation zu einem produktionsynchronen digitalen Zwilling des Materialflusses

### 5.2.1 Konzipierung der Erfassung und Bereitstellung relevanter Daten

Um die Simulation jederzeit von einem Ausgangspunkt starten zu können, der einer Momentaufnahme des gegenwärtigen Produktionsablaufs entspricht, sind in einem ersten Schritt die Daten zu identifizieren, die das DES-Modell auf diesen Zustand hin einstellen können. Die Simulation muss hierzu zum einen mit aktuellen Ständen von Daten und Informationen versorgt werden, die für den Modellaufbau notwendig sind (= Eingabedaten), und zum anderen mit Realwerten für Daten, die während eines Simulationslaufs für Berechnungen und Zustandsabbildungen generiert werden (= interne Modelldaten). Wie in Bild 72 skizziert, wird dies dadurch erschwert, dass die für die Simulation erforderlichen Werte nicht immer explizit in der notwendigen Form erfasst werden oder erfassbar sind. So ist beispielsweise die verbleibende Bearbeitungszeit in der Simulation dem bearbeiteten Element zugeordnet, wohingegen diese Information in der Realität aus der SPS der bearbeitenden Maschine hervorgeht.



Bild 72: Erforderliche Echtzeitdaten für die betriebsbegleitende Simulation

Für die Generierung des digitalen Zwillings sind demnach – wie in Bild 73 visualisiert – zunächst die erforderlichen Daten aus dem Simulationsmodell abzuleiten und hierfür die Orte in der realen Produktionsumgebung zu identifizieren, an denen die jeweiligen Echtzeitwerte generiert oder aufgezeichnet werden. Für alle Modellvariablen, denen kein Messwert aus der Realität entspricht, ist eine der in Abschnitt 2.3.4 aufgeführten Methoden heranzuziehen, um die erforderlichen Werte aus alternativen, erfassbaren Daten herzuleiten.



Bild 73: Ableitung und Integration der erforderlichen Daten für die betriebsbegleitende Simulation

Für die Anwendung in einem KS-Werk hat sich das dynamische Einschleusen beim Meldetermin am letzten Messpunkt nach HOTZ [164] als geeignet erwiesen, da dieses Vorgehen durch die Verwendung des vorliegenden DES-Modells aufwandsarm und detailgenau die relevanten Daten ermittelt.

Für die Ableitung der benötigten Daten aus dem Simulationsmodell sind zunächst alle Eingabedaten und internen Modelldaten zu identifizieren (s. a. Abschnitt 5.2.3). Diese finden sich in angebundenen Inputdateien sowie in Objektattributen, beweglichen Elementen, Tabellen und Steuerungsroutinen, wobei letztere beide auch integriert in Objekten und Elementen vorliegen. Daraufhin ist auf Basis ihrer Änderungshäufigkeit festzulegen, für welche dieser Daten ein Echtzeitwert Relevanz für die Abbildung der realen Produktion im DES-Modell besitzt. Hierunter fallen aus Bild 24 (Seite 51) insbesondere die Systemlastdaten und Ressourceneinstellungen. Stammdaten sowie Struktur- und Ablaufinformationen sind relativ konstant und können entweder manuell im Modell angepasst oder, beispielsweise im Fall von Arbeitsplänen, Stücklisten oder Fabrikkalendern, über Datei- oder Datenbankschnittstellen eingebunden werden.

Die anzubindenden Echtzeitdaten lassen sich in Produkt-, Anlagen- und Auftragsdaten einteilen, die untereinander in Beziehung zu setzen sind. Bild 74 stellt die für den betriebsbegleitenden Einsatz des KS-Referenzmodells zu erfassenden Daten in dieser Struktur exemplarisch für den Pressbereich dar. Neben den einzubindenden Daten ist ebenso die Vorgabe eines Datenformats sowie eines Auslösers für die Aufnahme der Messwerte notwendig. Als Auslöser können Ereignisse (z. B. Änderungen des Betriebszustands, Lichtschrankenunterbrechungen) oder vorgegebene Messzyklen, deren Länge auf die Erreichung der notwendigen Aussagekraft hin auszulegen ist, eingesetzt werden.

Sind die Daten erfasst und physikalisch mit dem DES-Modell verbunden (s. Abschnitt 5.2.2), können sie entweder direkt oder nach vorheriger Transformation in das entsprechende Attribut des Simulationsmodells eingesetzt werden (Bild 73: ②). Alle Daten, die auf diesem Wege nicht eingebunden werden können, dienen dazu, aus ihnen fehlende Informationen für die Einrichtung des Echtzeitabbilds herzuleiten (Bild 73: ③). Dieses Vorgehen ist in Abschnitt 5.2.3 detailliert erläutert.

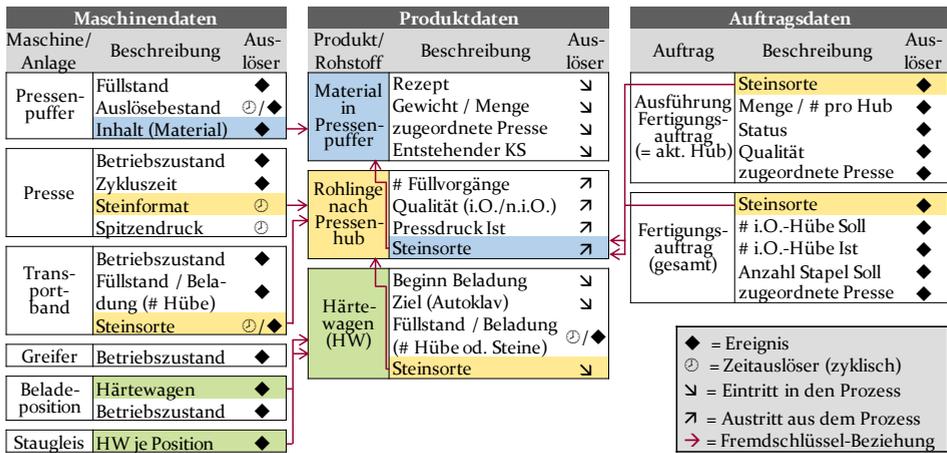


Bild 74: Zu erfassende Daten für den betriebsbegleitenden Einsatz (Pressen)

### 5.2.2 Technische Anbindung des KS-Cockpit an Automatisierungssysteme

Aufgrund der Erfordernis, ein sehr detailliertes Abbild des aktuellen Produktionszustands in Echtzeit im DES-Modell zu erschaffen, ist eine Datenanbindung zu realisieren, die große Datenmengen in kurzer Zeit transferieren kann. Hierfür bieten sich vornehmlich die drei in Bild 75 aufgezeigten Architekturen und Kommunikationsprotokolle an, die je nach Modernisierungsgrad der IT-Infrastruktur gewählt werden können (s. a. [P14]). Die Simulationsanwendung kann hierbei auf dem Leitrechner laufen, dies ist jedoch nicht zwingend erforderlich. Da die dritte Alternative aufgrund der semantischen Kopplung und der dezentralen Integrierbarkeit in SPS hochflexible Fertigungsstrukturen unterstützt, unabhängig von Herstellern, Betriebssystemen und Programmiersprachen verwendet werden kann und ein weit verbreitetes Kommunikationsprotokoll beinhaltet, ist sie zu favorisieren und wird im Folgenden weiter detailliert.

Zur Einrichtung einer Echtzeitanbindung der erforderlichen Simulationsdaten aus der SPS an das Simulationstool sind die folgenden drei Schritte abzarbeiten (s. a. Bild 76):

1. Datenaufbereitung in der SPS
2. Datenbereitstellung im OPC-UA-Server
3. Verknüpfung des Servers mit dem Simulationstool

5 Methodik zur ressourceneffizienten Regelung der Produktionsprozesse durch betriebsbegleitende simulationsgestützte Optimierung

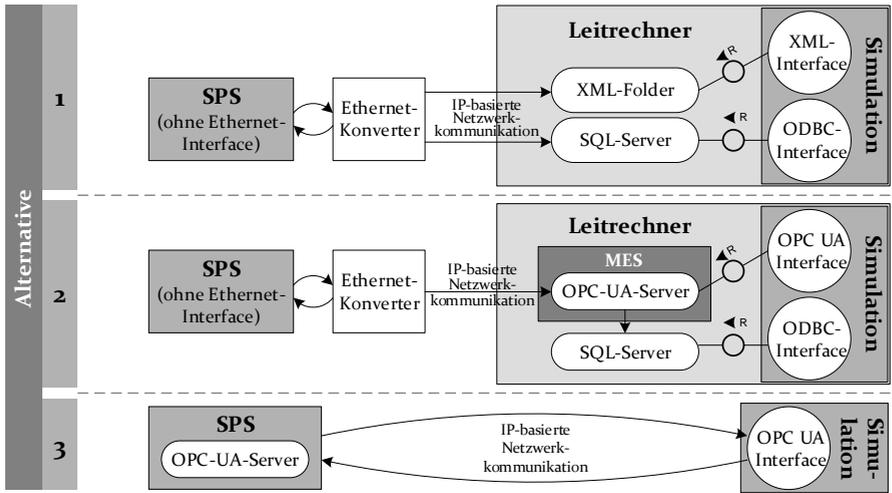


Bild 75: Alternativen zum Echtzeitdatentransfer zwischen SPS und Simulation

In Schritt 1 ist dafür zu sorgen, dass die im SPS-Zyklus generierten Informationen in Variablen gespeichert werden, die als Echtzeitdaten im benötigten Format aufbereitet zum OPC-UA-Server exportiert werden können. Zur Identifizierung und Adressierung müssen die Bezeichnung, Datenquelle und Datenbausteinadresse sowie der Datentyp aller Variablen bekannt sein. Sie werden zyklisch in einen globalen Datenbaustein geschrieben, der für die Weiterverwendung außerhalb der SPS bereitgestellt wird. Durch diese Trennung wird eine Störung des Funktionsablaufs vermieden.

Der zweite Schritt überführt die bereitgestellten Daten in einen OPC-UA-Server. Ist dieser in die SPS integriert, muss er über die Steuerungsverwaltungssoftware aktiviert und eingerichtet werden. Die Daten können zwar unstrukturiert dort abgelegt und dennoch adressiert werden, für eine bessere Übersichtlichkeit und Erweiterbarkeit empfiehlt sich aber der Einsatz eines geeigneten Informationsmodells. Nach Export der Variablen-tabelle der SPS über die Steuerungsverwaltungssoftware können anhand der aufgeführten Bezeichnungen, zugehörigen Adressen, Datentypen und Variablenbeschreibungen die bereitzustellenden Daten ausgewählt und im OPC-UA-Server angelegt werden. Dort werden im Betrieb die Werte gespeichert.

Für den Zugriff auf die bereitgestellten Daten sind alle Komponenten (SPS, OPC-UA-Server, Leitreechner) per Ethernet über den Router in das Firmennetz zu integrieren, mit IP-Adressen zu versehen und über deren Ports miteinander in Verbindung zu bringen. Besitzt die SPS keine Ethernet-Schnittstelle und entsprechend im Regelfall auch keinen integrierten OPC-UA-

Server, so kann ein Ethernet-Konverter auf den Profibus-Port der SPS aufgesteckt und der OPC-UA-Server auf dem Leitreechner angelegt werden. Der Konverter ist neben der physikalischen Anbindung ebenso in der Steuerungsverwaltungssoftware als Komponente anzulegen und zu konfigurieren. Durch Schreibrechte für OPC-UA-Clients auf dem Server besteht zugleich die Möglichkeit, Steuerungsanweisungen beispielsweise aus der Simulation direkt an die SPS zu senden (vgl. Abschnitt 5.1.4, Bild 70).

Im letzten Schritt ist zunächst eine OPC-UA-Schnittstelle im Simulationstool anzulegen, die den entsprechenden Server adressiert. Für jeden Namensraum kann anschließend individuell ein Lese- und Schreibintervall angegeben werden. Dies würde für die Einbindung der Daten an den vorgesehenen Stellen im Simulationsmodell genügen, sofern die Schnittstelle im Tool ausreichend entwickelt ist. Oftmals ist es aber erforderlich, die Bezeichner und Datentypen manuell vom Server zu übertragen, damit dieser die entsprechenden Daten dorthin schreibt. Über einen individuell festgelegten Alias-Wert je Datenpunkt, kann dieser innerhalb der Simulation adressiert und dessen Wert an das entsprechende Objekt übermittelt werden. Die weitere Initialisierung des Modells mit Echtzeitdaten ist im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

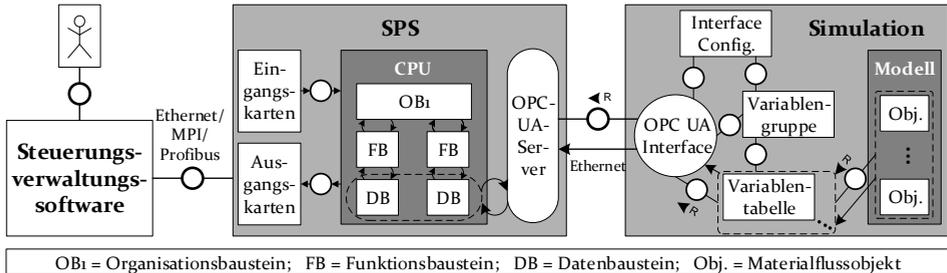


Bild 76: Einrichtung der Datenverbindung über eine OPC-UA-Schnittstelle

### 5.2.3 Implementierung des betriebsbegleitenden Simulationsmodells

Zur Aktualisierung der Simulation auf den gegenwärtigen Produktionszustand sind die eingelesenen Echtzeitdaten mit den Simulationselementen zu verknüpfen. Dies kann durch manuelle Einrichtung von Verknüpfungen oder eine automatische Anbindung auf Basis eines OPC-UA-Informationsmodells geschehen.

## Manuelle Einrichtung von Verknüpfungen

Liegen die Daten bereits in der benötigten Form vor oder können durch einfache Umrechnung entsprechend transformiert werden, adressiert man sie an der jeweiligen Stelle in der Simulation. Zunächst werden alle Tabellen, Steuerungsroutinen und ortsfesten Objekte durchlaufen und deren Attribute aktualisiert. Enthält ein Objekt bewegliche Elemente, so werden diese erzeugt und wiederum mit den zuordenbaren Daten versehen.

Um für bewegliche Elemente den aktuellen Ort sowie alle erforderlichen Eigenschaften zu erfassen, ist an verschiedenen Stellen (= Meldepunkte) im Produktionsprozess Sensorik angebracht. Kann WIP aufgrund lückenhafter Sensorik nicht für jedes ortsfeste Objekt erfasst werden, ist jedoch für einen ordentlichen Simulationsablauf bei der Erzeugung des Echtzeitabilds notwendig, so muss es durch ersatzweise Daten aus den umliegenden Meldepunkten hergeleitet werden. Dort werden die Informationen mit Zeitstempeln erfasst (s. Bild 77). Wenn nun die betriebsbegleitende Simulation, zum Beispiel zum Zwecke der Voraussimulation (s. Abschnitt 5.1.3), zum aktuellen Zeitpunkt  $t_s$  startet, ist der betrachtete Bereich vorab ab dem Zeitpunkt  $t_s - t_0$  unter Einbezug aller in diesem Zeitraum vorliegenden Umgebungsbedingungen (z. B. Betriebszustände) zu simulieren, um das WIP im DES-Modell zu dem aktuellen Aufenthaltsort zu befördern.

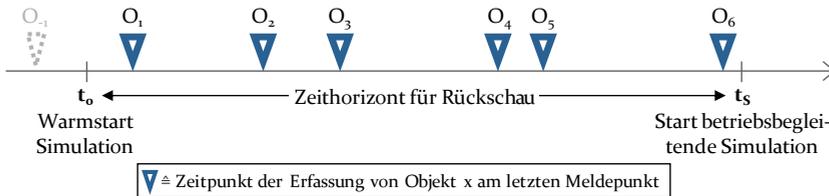


Bild 77: Zeithorizont für die dynamische Einschleusung am letzten Meldepunkt

Die Länge des Zeithorizonts für die Rückschau ist von der im Betrachtungsbereich vorliegenden Materialbeschaffenheit abhängig. Durch die Behandlung von Schüttgut im DES-Modell als Stückgut ist die Chargenzusammensetzung eines Gesamtvolumens (z. B. im Reaktor) rückwirkend anhand der Zuführungsaufträge nachzuvollziehen. Die unterschiedliche Behandlung von Schütt- und Stückgut ist in Tabelle 16 erläutert.

Exemplarisch für lückenhafte Sensorik ist in Bild 78 der Pressenbereich abgebildet. Die hergestellten KS werden zunächst nur direkt bei deren Entstehung in der Presse erfasst. Bis sie auf einen Härtewagen, der nur bei dessen Ankunft im Pressenbereich registriert wird, umgelagert werden, wird deren Standort nicht mehr aufgezeichnet. Erst bei Übergabe des vollen

Härtewagens an die Rohlingsbühne wird die KS-Sorte und -Menge wieder an ein übergeordnetes System übergeben.

Tabelle 16: Dynamische Einschleusung erfasster Materialströme in ein DES-Modell

Stückgut	Schüttgut	
	Statische Objekte	Transportobjekte
Der Zeithorizont für die Rückschau im Betrachtungsbereich zwischen zwei aufeinanderfolgenden Meldepunkten kann anhand der Zeitstempel der am ersten Meldepunkt eingehenden Güter ermittelt werden. Die Anzahl der beim Warmstart eingeschleusten Güter, deren weiterführender Pfad bekannt sein muss, ist maximal so groß, wie die für den weiteren Pfad innerhalb des Betrachtungsbereichs vorhandene Kapazität. Alle in diesem Zeitraum eingeschleusten Güter werden in die Simulation einbezogen. Vor dem Zeitpunkt $t_0$ den Betrachtungsbereich verlassende BE werden vor dem Start der betriebsbegleitenden Simulation vernichtet.	Die Menge des enthaltenen Schüttguts ist im Regelfall wegen vorhandener Füllstandsonden bekannt. Über die am vorherigen Meldepunkt eingegangenen Materialchargen kann der Inhalt bestimmt und in der Simulation angelegt werden. Der Zeithorizont für die Rückschau errechnet sich aus den eingehenden Chargen, bis retrograd der gemessene Füllstand erreicht ist.	Um den auf Transportobjekten befindlichen Inhalt zu quantifizieren, zieht man den hierfür zuletzt gestarteten Transportauftrag heran. Aus dessen Geschwindigkeit, Durchflussmenge und befördertem Material lässt sich der aktuelle Inhalt bestimmen.

Für die Initialisierung der betriebsbegleitenden Simulation sind die Rohlinge bei deren Entstehung mit Informationen zu deren weiterem Pfad (Härtewagen oder Materialrückführung) und den Betriebszuständen der Anlage beim Warmstart in das System einzuschleusen.

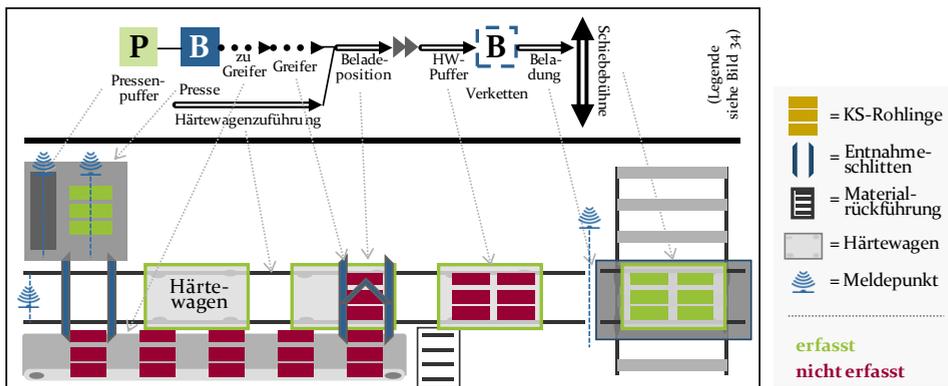


Bild 78: Lückenhafte Materialverfolgung im Pressenbereich

## OPC-UA-Informationsmodell

Bei vollständiger Digitalisierung des gesamten KS-Werks ist diese dynamische Einschleusung und individuelle, manuelle Datenverknüpfung nicht mehr erforderlich, sofern ein Informationsmodell (s. Abschnitt 2.4.3) vorliegt, das die Anforderungen für einen betriebsbegleitenden Simulationseinsatz erfüllt. Voraussetzung hierfür ist, wie in Abschnitt 5.2.2 angedeutet, ein Informationsmodell, das in seinem Mindestumfang auf den Bedürfnissen des DES-Modells basiert. Um dies zu erreichen, kann es aus dem vorliegenden DES-Modell abgeleitet werden. So ist sichergestellt, dass alle benötigten Daten in der erforderlichen Form direkt an deren Ursprung erfasst werden. Dennoch kann das Informationsmodell um zusätzliche Komponenten erweitert werden, um sich selbst hinreichend genau für eine Ankopplung ohne zusätzliche Schnittstellenarbeit an andere Automatisierungs- und Informationssysteme zu beschreiben. Setzt man dieses Informationsmodell bei der Einrichtung von OPC-UA-Servern in Automatisierungssystemen von KS-Anlagen ein, so kann die Simulation aufgrund der gegebenen Datensemantik automatisch mit den erfassten Daten verknüpft werden (s. Bild 79).

Mindestumfang Informationsmodell = Erforderliche Daten für ein Echtzeitabbild



Bild 79: Mindestumfang eines Informationsmodells zur betriebsbegleitenden Simulation

Zur Ableitung des Mindestumfangs für das Informationsmodell und dessen Anbindung an das Simulationstool empfiehlt sich das in Bild 80 skizzierte Vorgehen. Das Referenzmodell der KS-Simulation wird für die Erzeugung der Referenzarchitektur herangezogen. Zunächst werden die benötigten Anlagen- und Maschinentypen eingerichtet und mit den vom Referenzmodell für die Simulation benötigten Daten nach Datentypen geordnet zusammengestellt. Aufbauend auf dieser Datenbasis wird das Informationsmodell entsprechend der OPC-UA-Richtlinien erstellt und auf einem Server für den späteren Zugriff aus dem Simulationstool implementiert. Bis dahin beschreibt das Informationsmodell lediglich, welche Daten in welcher Struktur und Hierarchie vorliegen müssen, ohne mit Werten befüllt zu sein. Erst nach Integration der Daten aus der Fertigung liegt der digitale Schatten zur Integration in die Simulation vor.

Schritt	Arbeitspakete	Basis/Standards	Tools
Referenzmodell	<ul style="list-style-type: none"> <li>Allgemeinen Herstellungsprozess aufnehmen</li> <li>Einzelanlagen &amp; Sensor-/Meldepunkte identifizieren</li> </ul>	Simulationsmodell, KS-Produktion	MS Visio 
Datenbasis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vom Modell benötigte Daten ermitteln</li> <li>Stamm- und Bewegungsdaten klassifizieren</li> <li>Daten strukturieren und zu Objekten zuordnen</li> </ul>	Referenzmodell, Grundl. der Betriebsdatenstrukturierung	XMind  Umbrello  UML Modeller 
Informationsmodell	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kompatibles OPC-UA-Informationsmodell aller benötigten Daten erstellen</li> <li>Serverstruktur entwickeln</li> <li>Informationsmodell auf Server einspielen</li> </ul>	Datenbasis, OPC UA Standards, OPC UA Nodesets (ISA95, OPC UA-DI, -FDI)	UA Modeler  UA Expert  Java Script 
Digitaler Schatten/Zwilling	<ul style="list-style-type: none"> <li>Daten in Informationsmodell integrieren</li> <li>Informationsmodell an Simulationstool anbinden</li> </ul>	Informationsmodell, Schnittstellenpaket Simulationstool	Tecnomatix Plant Simulation 

Bild 80: Vorgehensmodell für die Erstellung des OPC-UA-Informationsmodells

Als Hauptbestandteil des Vorgehens wird im Folgenden die Entwicklung der Datenbasis und deren Übertrag in ein Informationsmodell genauer beleuchtet. Für das Referenzmodell und die Integration im Simulationstool sei auf die Abschnitte 3.1.2 und 5.2.2 verwiesen. Wie in Abschnitt 5.2.1 erwähnt, lassen sich alle benötigten Daten des DES-Modells aus den vier Komponenten Objekte, BE, Tabellen und Methoden herleiten. Für alle Komponenten werden die unterschiedlichen Instanzen und die zugehörigen Attribute nach dem in Bild 81 aufgezeigten Strukturierungsschema festgehalten.

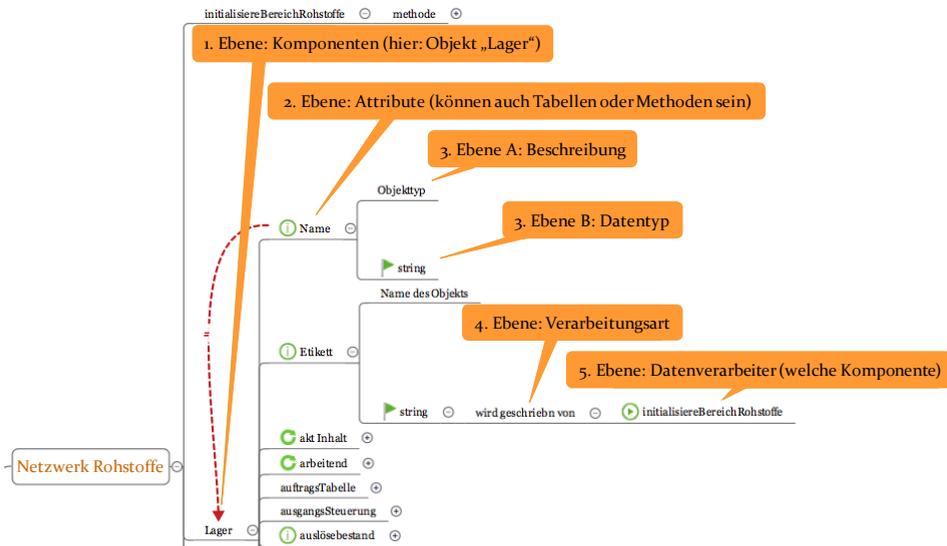


Bild 81: Gliederung der Objekt-Hierarchie in fünf Ebenen am Beispiel des Netzwerks „Rohstoffe“

Die Komponenten bilden die erste Gliederungsebene der Hierarchie. Die Auflistung der unterschiedlichen Attribute der Komponente (z. B. Stamm-, Bewegungsdaten, Tabellen oder Methoden) erfolgt auf der zweiten Ebene. Auf der dritten Ebene wird zunächst beschrieben, was das Attribut beinhaltet und gegebenenfalls der Datentyp des Attributs festgehalten. Ebene vier gibt Informationen über die Verarbeitungsart des jeweiligen Attributs (z. B. lesen, schreiben, aufrufen) wieder. Die fünfte Ebene bildet die Referenz zu der Methode, die das Attribut verarbeitet. Im aufgezeigten Beispiel schreibt die Methode „intialisiereBereich-Rohstoffe“ das Etikett.

Die aufgezeigte Strukturierung ist für alle Komponenten vorzunehmen. Die weiter erforderlichen Schritte werden anhand der Objekte erläutert. Für mehrmals im DES-Modell vorkommende Objekte ist nur ein Objekttyp im Informationsmodell anzulegen, der dann mehrmals instanziiert wird. Diese Objekttypen lassen sich aus den bestehenden Objekten ableiten und enthalten alle dort vorkommenden Attribute. Die Objekte der KS-Simulation lassen sich in fünf Objekttypen aufteilen (s. Bild 82). Um im Simulationsmodell ein Echtzeitabbild anhand der Attribute generieren zu können, müssen diese vollständig sein und präzise das reale Verhalten abbilden. Demnach sind für alle Objekttypen die Attribute vollständig entsprechend dem Verhalten der realen Pendanten anzulegen. Deren Aufbau geht aus Bild 82 exemplarisch für eine KS-Pressen hervor. Auf Basis dieser Vorarbeit lässt sich im Folgenden ein OPC-UA-Informationsmodell generieren, auf einem Server bereitstellen, mit Realdaten füllen und, wie zu Beginn des Abschnitts beschrieben, an das DES-Modell anbinden.

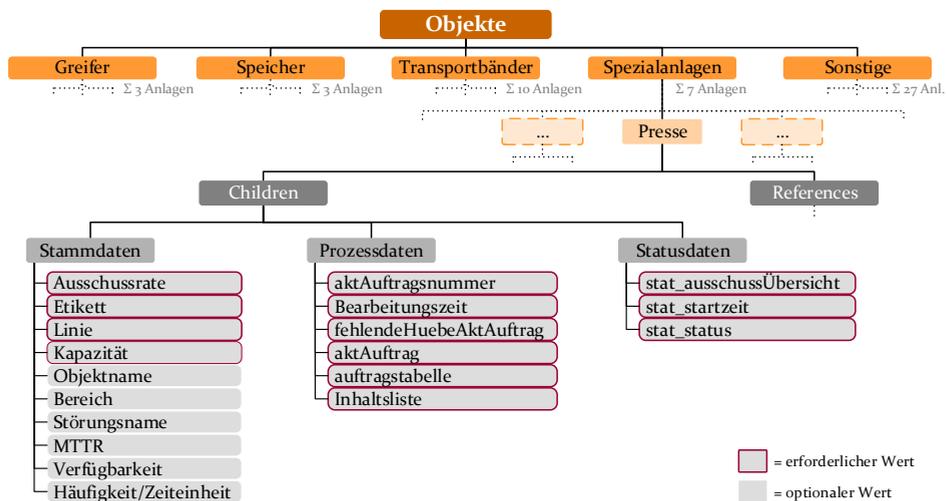


Bild 82: Aufbau der Objekttypen am Beispiel einer KS-Pressen

## 5.3 Implementierung der Methodik zur simulationsgestützten Fertigungsregelung

Nach Schaffung der methodischen und technischen Voraussetzungen ist zuletzt die Implementierung des KS-Cockpits zu konzipieren. Hierfür sind neben der technischen Anbindung der Echtzeitdaten die in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellten Simulations- und Optimierungskomponenten um ein Koordinierungsmodul zu erweitern. Dieses löst bei Planabweichungen, die von einer Monitoring-Komponente identifiziert werden, die nötigen Schritte für eine Umplanung aus. Ebenso wird hierdurch ein autonomer Betrieb des Tools ermöglicht. Letztlich übernimmt die Koordinierungseinheit die Bewertung der Analyse- und Optimierungsergebnisse sowie deren Übertragung in die Steuerungs- und Leitsysteme der Fertigung.

### 5.3.1 Aufbaustruktur des KS-Cockpit aus einzelnen Komponenten

Für den Einsatz des KS-Cockpit ist dieses mit externen Funktionselementen zu verknüpfen, welche in Bild 83 dargestellt sind: Das PPS-System wird zur Übertragung der angepassten Produktionsplanung benötigt, während das Production Monitoring zur Feststellung von Planungsabweichungen eingesetzt wird. Mit Daten der MDE/BDE kann das Simulationsmodell mit der aktuellen Auftragslage initialisiert werden. Aktuelle Materialfluss- und Maschinenzustände können direkt aus den SPS bezogen werden.

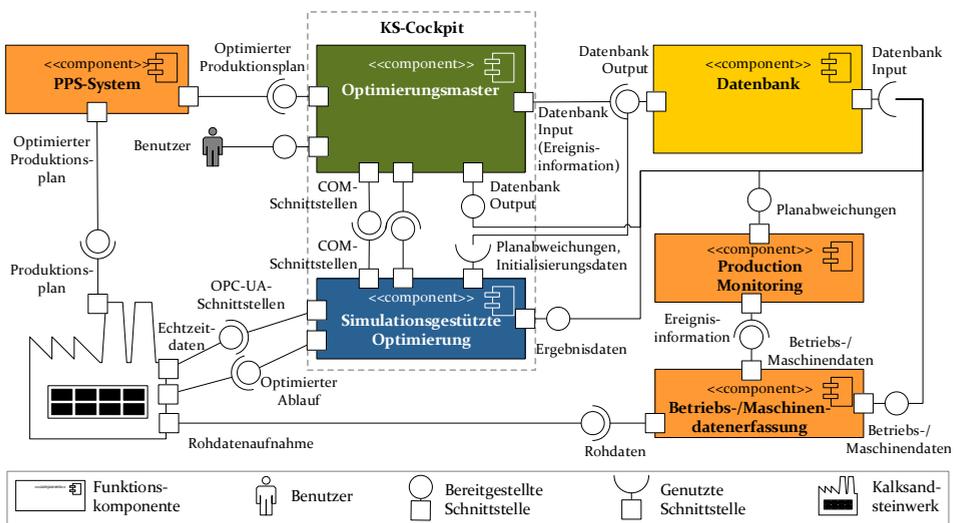


Bild 83: Zusammenwirken der Komponenten des KS-Cockpit (i. A. a. [P6])

Zur Kommunikation zwischen *Optimierungsmaster* und *simulationsgestützter Optimierung* wird eine COM-Schnittstelle (Component Object Model) eingerichtet, die plattformunabhängig ist und die Simulation per Fernaufruf startet und manipuliert. Zur zentralen Datenspeicherung und zum Datenabruf dient für alle Komponenten eine Datenbankschnittstelle, die beispielsweise über ODBC, SQLite oder Oracle<sup>®</sup> angebunden werden kann. Für den zügigen, direkten Datenaustausch zwischen den Komponenten des KS-Cockpit und externen Steuerungs- und Automatisierungssystemen bietet sich eine OPC-UA-Schnittstelle an, da sie neben der semantischen Kopplung und hohen Kompatibilität auch eine Datenübertragung in Echtzeit ermöglicht.

Der Kern des KS-Cockpit befindet sich in der Komponente mit der Bezeichnung *Simulationsgestützte Optimierung*, die in Bild 84 präzisiert wird. Hierin befindet sich neben den Optimierungsalgorithmen auch das Simulationsmodell, das für die Wirkungsermittlung ❶, die Voraussimulation und als Optimierungskomponente ❷ herangezogen wird, aber auch autonom verwendet werden kann. Über die COM-Schnittstelle zum Ereignismanager (s. Bild 85) wird die jeweilige Aufgabe ausgelöst ❸. Für den betriebsbegleitenden Einsatz der Simulation ist eine Initialisierungsroutine implementiert, die Echtzeitdaten aus der Produktion über die OPC-UA-Schnittstelle und Planabweichungen sowie den Auftragsstand aus der Datenbank bezieht. Die direkte Rückführung von Optimierungsergebnissen (vgl. Bild 70) kann auch direkt aus der Simulation heraus über die OPC-UA-Schnittstelle erfolgen ❹. All die genannten Funktionen können einheitlich in einem Simulationstool implementiert werden.

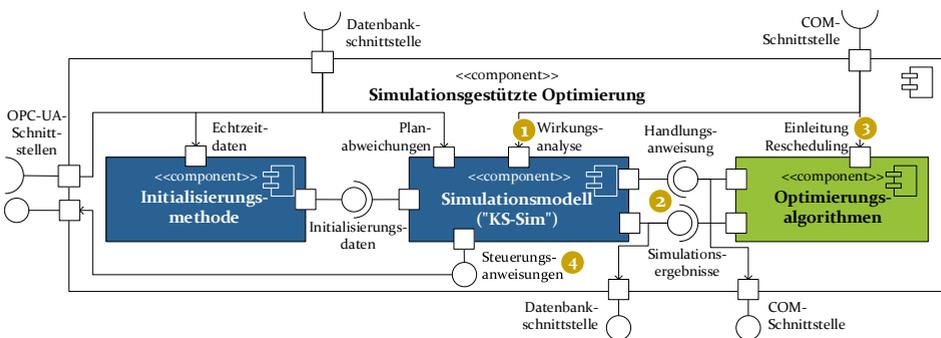


Bild 84: Komponentenstruktur des simulationsgestützten Optimierungsmoduls

Für die ordnungsgemäße Interaktion der Komponenten des KS-Cockpit wird eine Koordinationseinheit benötigt, wie sie in Bild 85 skizziert ist. Dieser *Optimierungsmaster* wird unabhängig als eigenständiges Programm

aufgesetzt, um jegliche Freiheiten bei der Gestaltung von Simulationsmodell und Optimierungsverfahren zuzulassen. Die Koordination der übrigen Komponenten erfolgt über eine COM-Schnittstelle.

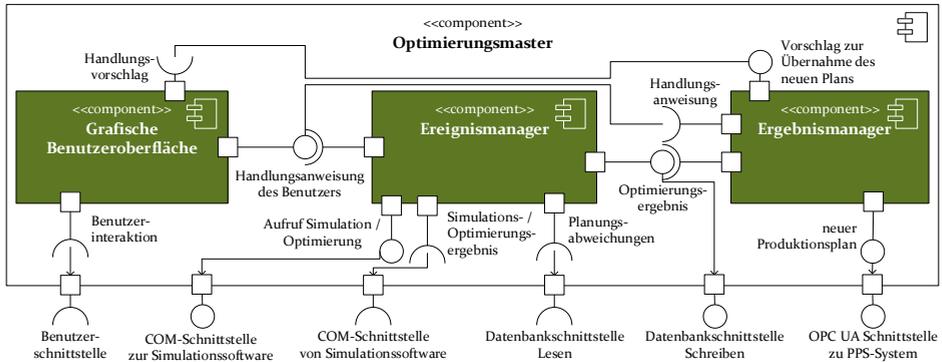


Bild 85: Zusammenwirken der Komponenten des Optimierungsmasters (i. A. a. [P6])

Der entsprechende Ablauf zur Herbeiführung eines Reschedulings wird in Abschnitt 5.3.2 detailliert erläutert. Folgende Aufgaben obliegen dem Optimierungsmaster:

1. Ereignismanager: Laufzeitüberwachung, Vorgabe des Programmablaufs und Steuerung der Untersuchung von Planabweichungen
2. Ergebnismanager: Ergebnisevaluierung und Übernahme des neuen Plans
3. Benutzeroberfläche: Eingriffsmöglichkeit des Anwenders durch Programmstart, Ausführungsüberwachung, Test potenzieller Planabweichungen und Entscheidung über Übernahme des optimierten Produktionsplans

### 5.3.2 Kommunikation zwischen den Komponenten des KS-Cockpit

In Ergänzung zur im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Architektur des KS-Cockpits beschreibt die Kommunikationsstruktur den Ablauf der Interaktion der einzelnen Komponenten im Betrieb. Dieser Ablauf ist in Bild 86 für das Eintreten einer kritischen Planabweichung exemplarisch visualisiert.

Als Ausgangsbasis wird beim Start des KS-Cockpit sowie bei jedem durchgeführten Rescheduling der aktuell verfolgte Produktionsplan in der Datenbank abgelegt. Mit diesem wird im ersten Funktionsblock ❶ die Simulation ausgeführt, um einen Referenz-Zielfunktionswert  $\hat{\varphi}_{PI}$  zu erhalten,

5 Methodik zur ressourceneffizienten Regelung der Produktionsprozesse durch betriebsbegleitende simulationsgestützte Optimierung

mit dem der Produktionsablauf bei eintretenden Abweichungen verglichen werden kann. Dieser ist in zyklischen Abständen (z. B. minütlich) zwischenspeichern, um dessen Veränderung auch bei zu späteren Zeitpunkten beginnenden Simulationen als Referenzwert einsetzen zu können.

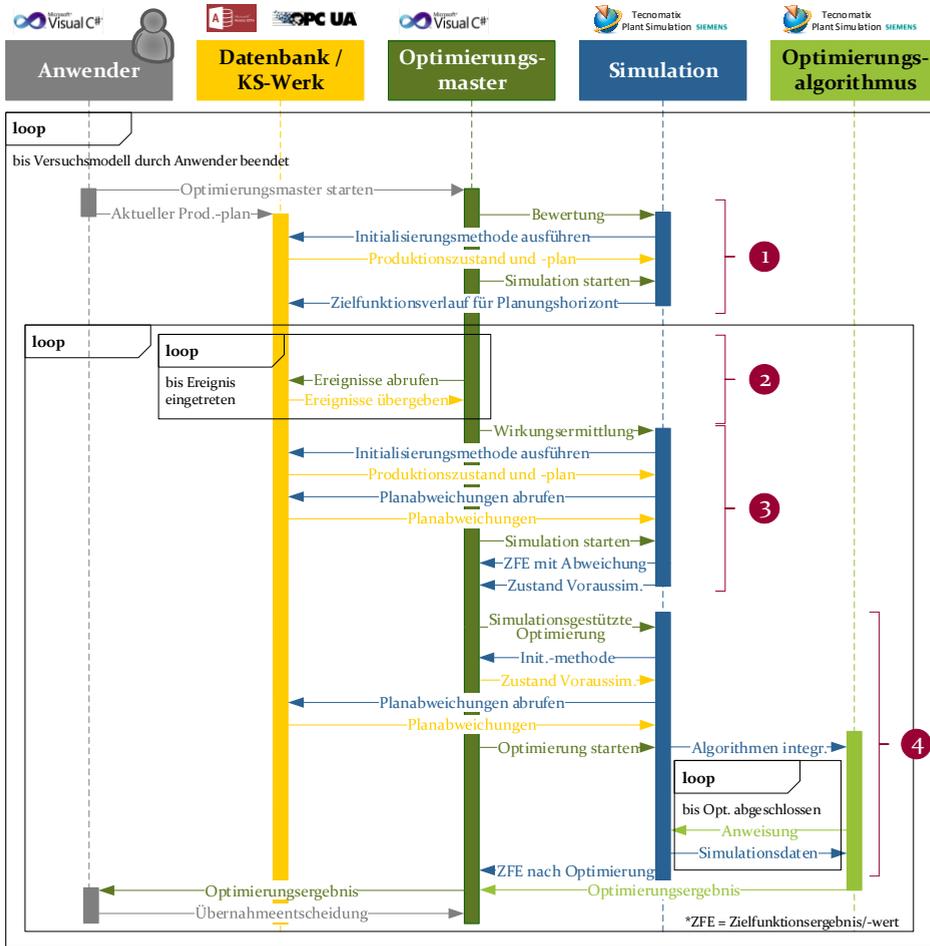


Bild 86: Kommunikationsstruktur zwischen den Komponenten des KS-Cockpits (i. A. a. [P6])

In Funktionsblock 2 wird die Datenbank vom Ereignismanager zyklisch nach eingetretenen Planabweichungen, die aus dem Production und Condition Monitoring (s. Abschnitt 2.4.4) eingespeist werden, abgefragt. Ist ein Ereignis eingetreten – hierzu zählt auch der Auslösezeitpunkt der periodischen Überprüfung auf eine Planverbesserung – delegiert der Ereignisma-

nager die Wirkungsermittlung an die Simulation ③. Nach Import des aktuellen Auftrags- und Anlagenzustands sowie vorliegender Planabweichungen speichert die Simulation den Ausgangspunkt für die Optimierung zwischen (s. *Voraussimulation* – Abschnitt 5.1.3) und ermittelt den Zielfunktionswert  $\hat{\varphi}_{WE}$  unter Einbezug der Planabweichungen. Verlässt dieser den zulässigen Bereich, so initiiert der Ereignismanager die simulationsgestützte Optimierung ④ zur Ermittlung eines neuen Plans. Andernfalls kehrt der Ereignismanager in den initialisierten Zustand zurück und wartet auf ein neues Ereignis. Ist während der Simulation ein neues Ereignis aufgetreten, wird diese sofort unterbrochen und mit der aktualisierten Situation neu gestartet. Ab einer definierten Grenzzahl an Unterbrechungen wird der Vorgang nicht mehr abgebrochen, um die Reaktionsfähigkeit des Systems zu erhalten.

Als Ausgangspunkt von Funktionsblock ④ wird der Stand des Simulationsmodells nach Abschluss der Voraussimulation gewählt und um die Planabweichungen ergänzt. Daraufhin startet der Ereignismanager die Simulation unter Einbezug der Optimierungsalgorithmen (vgl. Kapitel 4). Auf der Benutzeroberfläche kann der Anwender eine geeignete Parametrisierung einstellen. Wird zwischenzeitlich eine neue Planabweichung detektiert, so wird die simulationsbasierte Optimierung analog zur Simulation unterbrochen und unter Berücksichtigung der aktualisierten Situation neu gestartet. Nach Abschluss der Optimierung meldet die Simulation den Zielfunktionswert  $\hat{\varphi}_{SO}$  an den Ergebnismanager. Liegt dieser außerhalb der Grenzwerte für den Wert der Wirkungsanalyse, so wird dem Anwender die Übernahme des neuen Plans empfohlen. Dieser trifft letztlich die Entscheidung und teilt sie dem Ergebnismanager über die Benutzeroberfläche mit. Hieraus wird der neue Plan über die OPC-UA-Schnittstellen an das PPS-System sowie optional direkt an die Anlagen kommuniziert.



## 6 Validierung und Umsetzung des Gesamtsystems

Die Gültigkeit der vorgestellten Modelle, Effektivität der Verfahren und Umsetzbarkeit der Konzepte wird im Folgenden anhand der Auswertung von Testläufen, ihrer erfolgreichen Implementierung und ihrer Etablierung in Fallstudien validiert. Gemäß der Herleitung des Gesamtsystems erfolgt die Validierung zunächst für die Simulationskomponenten, daraufhin für die Optimierungsverfahren und abschließend für deren Zusammentreffen im Gesamtsystem zur simulationsgestützten Fertigungsregelung.

### 6.1 Evaluierung der Simulationsmodellierung

Als Grundlage für alle werksspezifischen Simulationsmodelle wurde das in Abschnitt 3.1.2 vorgestellte generische Baukasten-Modell entwickelt. Desse Eignung für die präzise und zügige Abbildung der KS-Werksprozesse, die aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen bei jedem Einsatz schwer zu quantifizieren ist, stellte sich in diversen Fallstudien unter Beweis. Zwar ist nicht jeder Spezialfall vollumfänglich abgedeckt, jedoch wurde der Baukasten mit jeder zusätzlichen Fallstudie den hinzukommenden Anforderungen entsprechend angepasst. Die mithilfe des Baukastens generierten, spezifischen Simulationsmodelle für einzelne Werke (s. Bild 87) sind anhand der Gegenüberstellung mit Realdaten individuell zu validieren und verifizieren. Hier hat sich der Einsatz von Kennzahlen wie Gesamtausbringung, Gesamtdurchlaufzeit, Auftragsfertigstellungen oder Härtezeiten etabliert.

Für den Nachweis der Einsetzbarkeit des Baukasten-Modells und die Validität des entstehenden Simulationsmodells dient eine hierfür durchgeführte Fallstudie in dem in Bild 87 dargestellten Werk (acht Rohstoffe, ein Mischer, drei Reaktoren, drei Pressen, zwölf Durchzugskessel für je zwölf Härtewagen, eine Verpackungslinie). Dieses ist rein aus Standardbausteinen des KS-Simulationsbaukastens zusammengestellt, wobei werksspezifische Anpassungen der Materialflussteuerung erforderlich waren.

Die Validierung des Modells erfolgt nach RABE ET AL. [146] durch einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit aufgezeichneten Daten. Um das Modell hinsichtlich der Genauigkeit in Bezug auf den Durchlauf des gesamten Stoff- und Güterstroms zu validieren, werden Ergebnisdaten des letzten Prozessschritts herangezogen. So werden die ankommenden Objekte in

der Simulation mit den über einen Zeitraum von 24 Stunden erfassten Verpackungseinheiten in der realen Verpackungslinie gegenübergestellt.

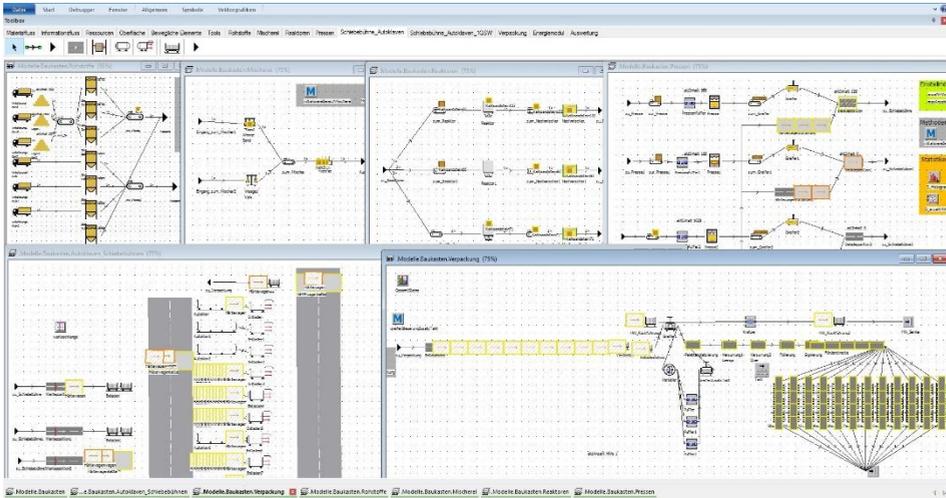


Bild 87: Spezifisches DES-Modell eines KS-Werks auf Basis des Baukastens

Aufgrund einer fehlenden Erfassung von Startzeitpunkten der Fertigungsaufträge ist die Gegenüberstellung anhand der frühesten und spätesten Ankünfte der Steinpakete im Verpackungsbereich vorzunehmen. Hierzu werden die erforderlichen Fertigungsaufträge für die erfassten Verpackungseinheiten in ein eingeschwungenes Simulationsmodell eingespeist und deren Ankünfte im Verpackungsbereich aufgezeichnet. In Bild 88 sind die Fertigungsaufträge (links) sowie die letzten Ankünfte aus den einzelnen Aufträgen (rechts) dokumentiert.

Produktionsplanung Pressen					
Presse	Auftrag	Typ	# HW	Steine je HW	# Steine
Presse 1	ANoo1	Kalksandstein66	24	128	3.072
	ANoo4	Kalksandstein102	30	144	4.320
	ANoo7	Kalksandstein99	8	72	576
	ANoo8	Kalksandstein15	6	640	3.840
	ANoo9	Kalksandstein6	7	640	4.480
Presse 2	ANoo2	Kalksandstein67	24	128	3.072
	ANoo5	Kalksandstein93	50	72	3.600
	ANoo10	Kalksandstein27	9	432	3.888
	ANoo3	Kalksandstein68	24	128	3.072
Presse 3	ANoo6	Kalksandstein71	50	108	5.400
	ANoo11	Kalksandstein8	8	288	2.304

Produktionsstatistik			
string	integer	time	str
string	Steinsorte	# Steine	Fertigstellung
1	Kalksandstein66	3072	1:17:52:17.5
2	Kalksandstein67	3072	1:15:57:38.3
3	Kalksandstein68	3072	1:14:05:38.5
4	Kalksandstein102	4320	2:07:26:35.5
5	Kalksandstein93	3600	2:13:42:35.1
6	Kalksandstein71	5400	2:09:34:01.7
7	Kalksandstein99	576	2:13:46:57.8
8	Kalksandstein15	3840	2:15:31:27.8
9	Kalksandstein16	4480	2:19:46:19.8
10	Kalksandstein27	3888	2:17:11:35.2
11	Kalksandstein38	2304	2:11:24:20.6

= Fertigungsaufträge als Vorlauf zum Einschwingen des Modells  
 = Fertigungsaufträge als Nachlauf zum Abschwingen des Modells

Bild 88: Fertigungsaufträge als Validierungsgrundlage (links) sowie Zeitpunkte der Ankunft des jeweils letzten Steinpakets eines Auftrags als Validierungsergebnis (rechts)

Die erstmalige Ankunft eines Steinpakets aus den im Werk durchgeführten Fertigungsaufträgen wurde zum Zeitpunkt 1:14:06:48 (d:hh:mm:ss) aufgezeichnet. Das letzte Steinpaket der erfassten Fertigungsaufträge ist zum Zeitpunkt 2:15:31:27 in der Simulation protokolliert worden. So wurden in der Simulation alle Aufträge innerhalb von 25,41 Stunden abgewickelt. Im Vergleich mit einem Wert von 25,13 Stunden aus den erfassten Verpackungsdaten stellt sich lediglich eine Abweichung von 1,11 % heraus. Somit kann das Baukasten-Modell als geeignet für die Abbildung eines KS-Werks in der Materialflusssimulation angesehen werden.

In den durchgeführten Fallstudien erweist sich auch die in Abschnitt 3.1.3 gewählte Modellierung von Schüttgut als geeignet. Neben der hinreichend genauen Abbildung ist auch die Zeitersparnis im Vergleich zu alternativen Modellierungsvarianten mit ähnlicher Genauigkeit entscheidend. Diese lässt sich durch die Auswertung des Beispielmodells, das in Bild 89 aufgezeigt ist, nachweisen. Es wird der Produktionsbereich von einem Reaktor bis zu einer Presse exemplarisch für eine Woche (Simulationszeit) unter verschiedenen Schüttgutmodellierungen in Plant Simulation (Version 14) simuliert. Stellt man die Simulationsdauern  $t_{\text{Sim}_{<\text{Variante}>}}$  gegenüber, so stellt man fest, dass bei der favorisierten Variante mit  $t_{\text{Sim}_{(e)}} = 0,863 \text{ s}$  im Vergleich zu Variante (a) mit  $t_{\text{Sim}_{(a)}} = 13,754 \text{ s}$  eine zeitliche Einsparung von 93,7 % erzielt werden kann. Auch gegenüber der *Mini*-Variante mit  $t_{\text{Sim}_{(b)}} = 2,527 \text{ s}$  können mit der favorisierten Variante zusätzlich zu einer höheren Modellgenauigkeit Einsparungen in Höhe von 65,9 % erreicht werden. Die beiden anderen Varianten werden nicht betrachtet, da sie die Realität zu stark verzerren und demnach nicht für die KS-Simulation geeignet sind.

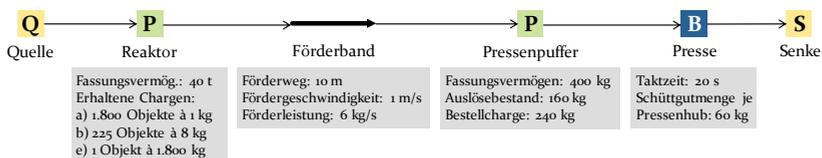


Bild 89: Teilmodell der KS-Herstellung zur Auswertung der Laufzeiteinsparung bei geeigneter Schüttgutmodellierung

Eine weitere Fallstudie in einem KS-Werk zur Integration der elektrischen Energieverbräuche in das Simulationsmodell (s. Abschnitt 3.2.1) bildet die Basis für die Bewertung der Güte dieser Art der Energiesimulation. Bei Einbezug von 16 Anlagen unter Prozessierung dreier Steinformate ergab sich eine mittlere Abweichung von 0,33 % (minimal: 0,01 %; maximal: 1,42 %). Zwar stellt dies bereits einen sehr guten Wert dar, jedoch lässt sich dieser durch eine kontinuierliche und differenziertere Aufnahme des Strombedarfs für eine detailliertere Berechnungsbasis weiter verbessern.

Die Eignung der Modellierung der thermodynamischen Wechselwirkungen vor und während des Härteprozesses (vgl. Abschnitte 3.2 und 3.3) in der Energiesimulation kann mittels folgender Fallstudie nachvollzogen werden. Anhand des Simulationsmodells eines KS-Werks (fünf Rohstoffe, zwei Mischer, zwei Reaktoren, zwei Pressen, sechs Sackkessel für zehn und vier Sackkessel für zwölf Härtewagen, eine Verpackungslinie) wird die thermodynamische Modellierung der konventionellen Modellierung mit festen Bearbeitungszeiten gegenübergestellt. Das abgebildete Werk weist in der Realität einen durchschnittlichen Durchsatz von 11,0 AK/Tag auf. Durch die unpräzise, konventionelle Modellierung mit festen Bearbeitungszeiten, bei der anstelle der Berücksichtigung thermodynamischer Einflüsse Soll-Härtekurven (vgl. Bild 40) angesetzt werden, erhält man in der Simulation eines Produktionsmonats (kontinuierliches Schichtmodell) einen Wert von 15,3 AK/Tag. Dies entspricht einer Abweichung von der Realität um 39,1 %. Durch die genauere Modellierung unter Berücksichtigung thermodynamischer Wechselwirkungen gemäß Abschnitt 3.3 erhält man im selben Modell hingegen einen durchschnittlichen Durchsatz von 11,7 AK/Tag, was einer Abweichung von 6,4 % entspricht. Der Unterschied dieser beiden Modellierungsformen ist auch an der Anzahl an zeitgleich aktiven Härteprozessen im Zeitverlauf zu erkennen (s. Bild 90). Somit erweist sich die thermodynamische der konventionellen Modellierung weit überlegen.

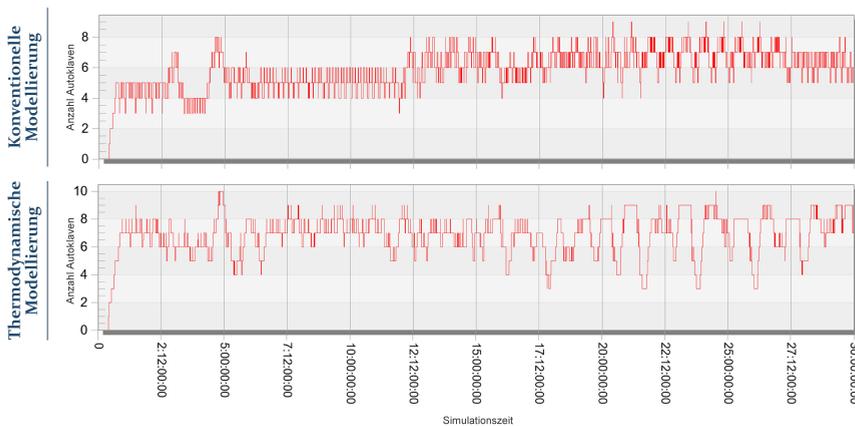


Bild 90: Anzahl aktiver Härteprozesse im Zeitverlauf als Simulationsergebnis für die konventionelle Modellierung (oben) und die Modellierung mit Berücksichtigung der thermodynamischen Wechselwirkungen (unten)

Für weitere Einzelheiten zur Wirksamkeit der Energiesimulation des Härteprozesses in der Anwendung sowie zur Güte der Modellierung der thermodynamischen Wechselwirkungen sei auf die Veröffentlichungen [P2] und [P7] des Autors verwiesen.

## 6.2 Bewertung der Eignung der Optimierungsverfahren

Die im vierten Kapitel vorgestellten Optimierungsansätze sind nur dann zweckgemäß, wenn sie in hinreichend kurzer Zeit Lösungen generieren, die mit gängigen Ablaufregeln nicht erzielbar sind. Für eine integrierte Absatz-, Losgrößen- und Reihenfolgeplanung (s. Abschnitt 4.2) wurde in Java eine eigenständige Anwendung entwickelt, die aufgrund der zugeschnittenen Benutzeroberfläche eine übersichtliche Einstellung der Optimierungsparameter ermöglicht (s. Bild 91). Als Berechnungsbasis dient eine Absatzprognose, die basierend auf Vergangenheitsdaten mithilfe des SARIMA-Verfahrens die voraussichtlichen Absätze für den Planungszeitraum errechnet. Hieraus, oder alternativ aus einem importierten Absatzplan, generiert das in Abschnitt 4.2.3 erläuterte Verfahren optimale Losgrößen und Auftragsabfolgen, wie sie im unteren Bildbereich in einem Gantt-Diagramm visualisiert sind. In Bezug auf die Leistungsfähigkeit des Berechnungsverfahrens sei auf die Veröffentlichung [P12] des Autors verwiesen.

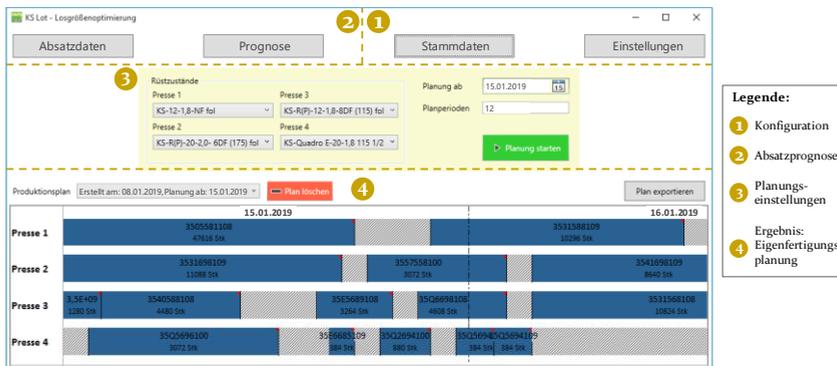


Bild 91: Tool zur integrierten Absatz-, Losgrößen- und Reihenfolgeplanung

Für den weiteren Durchlauf des Dekompositionsverfahrens (Subsystem 2 bis 4), kann die gezeigte Anwendung mit der Simulationssoftware (hier: Plant Simulation) gekoppelt und so die Einstellungen und Ergebnisse automatisch transferiert werden. Die Umsetzung und Evaluierung des Dekompositionsverfahrens kann anhand der Publikationen [P3, P5] des Autors nachvollzogen werden. Erzielte Rechenzeiten von maximal zwei Minuten für das Auffinden einer Optimallösung für eine durchschnittliche Produktionswoche (400 Härtewagen, drei Pressen, acht Autoklaven) werden als akzeptabel angesehen. Diese werden bei Verwendung einer gängigen Workstation (CPU: Intel Xeon E3-1270v5 @ 3,6 GHz, Kerne: 4 Stück (8 Threads), RAM: 32 GB) erreicht [P5]. Unter Einsatz eines leistungsfähigeren Rechners lassen sie sich weiter reduzieren.

Um den Mehrwert des Dekompositionsverfahrens aus Abschnitt 4.1.3 exemplarisch zu demonstrieren, zeigt Bild 92 die Veränderung des Zielfunktionswerts in Abhängigkeit der gewählten Beladungsstrategie und der eingesetzten Autoklaven für drei verschiedene Auftragspläne auf. Die Ergebnisse entstammen einer Fallstudie in einem KS-Werk (vier Rohstoffe, ein Mischer, drei Reaktoren, drei Pressen, sechs Durchzugskessel für je acht Härtewagen, zwei Verpackungslinien) und bilden einen Produktionsmonat ab. Hieran ist ersichtlich, dass zum einen die Wahl der eingesetzten Autoklaven einen maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz der Produktion haben kann. Zum anderen geht aus der nebenstehenden Tabelle hervor, dass nicht die optimale Auftragsplanung aus Subsystem 1 (vgl. Abschnitt 4.1.2) zum kleinsten Zielfunktionswert führt, sondern die zweitbeste Lösung, was die Wichtigkeit der Rekursionsschleifen im Dekompositionsverfahren unterstreicht. Anhand dieses Fallbeispiels ist erkennbar, dass der Einsatz von simulationsgestützter Optimierung dazu beitragen kann, standardisierte Vorgehen oder betriebliche Entscheidungen, die zu Ineffizienzen und hohen Ressourcenverbräuchen führen, zu vermeiden.

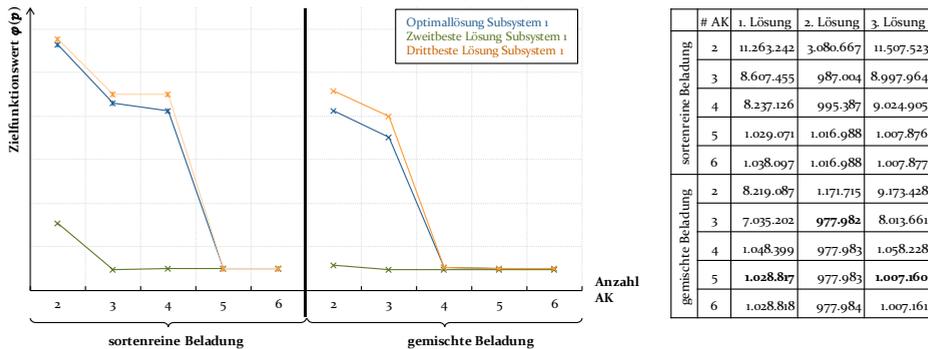
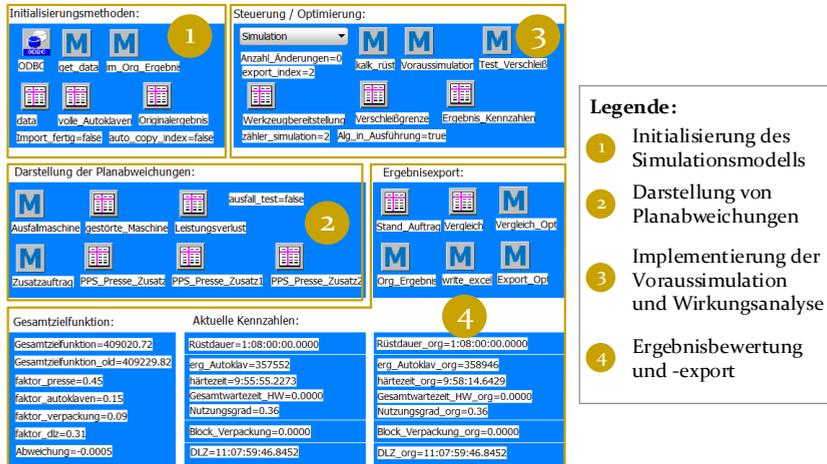


Bild 92: Veränderung des Zielfunktionswerts für drei Auftragspläne aus Subsystem 1 in Abhängigkeit der Freiheitsgrade "Anzahl Autoklaven" und "Beladungsstrategie" in Subsystem 2

### 6.3 Validierung der Methodik zur simulationsbasierten Fertigungsregelung

Die Einsetzbarkeit der in Kapitel 5 hergeleiteten und ausgeführten Methodik ist aufgrund ihres ganzheitlichen Charakters (vgl. Bild 67) im Zusammenspiel aller Komponenten zu bewerten. Da eine vollständige Erfassung und Verknüpfung der erforderlichen Echtzeitdaten in einem KS-Werk bislang nicht realisiert werden konnte, wird einzig bei den verwendeten Echtzeitdaten mit Dummy-Werten gearbeitet. Alle übrigen Komponenten wur-

den implementiert respektive bereits bestehende Komponenten (Simulationsmodell, Optimierungsverfahren) erweitert (s. Bild 93) und mit einem Koordinationsmodul verknüpft. Zu diesem Zweck wurde der Optimierungsmaster in Visual C# umgesetzt.



- Legende:**
- 1 Initialisierung des Simulationsmodells
  - 2 Darstellung von Planabweichungen
  - 3 Implementierung der Voraussimulation und Wirkungsanalyse
  - 4 Ergebnisbewertung und -export

Bild 93: Implementierung der Funktionen des KS-Cockpit in Plant Simulation

Als Fallbeispiel wird ein Produktionszeitraum von 14,6 Tagen mit 15 Fertigungsaufträgen auf drei Pressen herangezogen. Bei der Simulation treten nun die in Bild 94 aufgeführten Ereignisse ein:

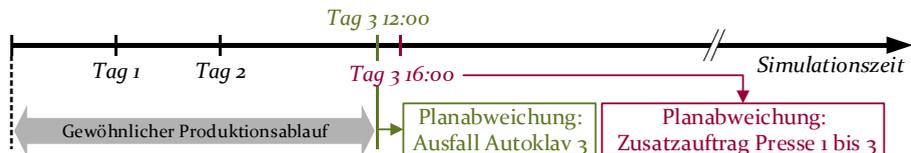


Bild 94: Eintretende Planabweichungen im Fallbeispiel

Bei der ersten Planabweichung wird durch das KS-Cockpit mithilfe der Simulation zur Wirkungsermittlung (s. Abschnitt 5.1.2) festgestellt, dass keine Optimierung der Ursprungsplanung erforderlich ist. Dies ist aus der Ergebnisausgabe ersichtlich, in der die Abweichung von der Ursprungsplanung unter der festgelegten Grenze von 5,0 % des Zielfunktionswerts liegt (vgl. Bild 95: 1). Da das KS-Werk zu diesem Zeitpunkt nicht voll ausgelastet ist, kann die weggefallene Kapazität im Härtebereich durch einen anderen der insgesamt sechs Autoklaven ausgeglichen werden (vgl. Bild 95: 2). Hierdurch ergibt sich keine Blockadesituation, weshalb der Materialfluss unbeeinflusst weiterlaufen kann (vgl. Bild 95: 3). Es besteht folglich nicht die Notwendigkeit umzuplanen.

**Auftragsplanung vor Optimierung** Abweichung: 0,02502

Auftragsname	PresseBeginn	PresseEnde	PresseSteinsorte	Presse1Beginn	Presse1Ende	Presse1Steinsorte	Presse2Beginn	Presse2Ende
Auftrag_1	24.07.2017 22:26:57	30.07.2017 15:11:52.8452	Kalksandstein 7	24.07.2017 18:58:45	28.07.2017 23:13:52.8452	Kalksandstein 3	24.07.2017 20:02:45	27.07.2017 17:22:45
Auftrag_2	29.07.2017 09:46:57	01.08.2017 04:07:40.8452	Kalksandstein 7	27.07.2017 17:22:45	02.08.2017 19:53:10.8452	Kalksandstein 6	26.07.2017 08:30:15	28.07.2017 15:43:45
Auftrag_3	31.07.2017 04:42:57	02.08.2017 02:22:51.8452	Kalksandstein 8	01.08.2017 06:40:15	03.08.2017 23:50:58.8452	Kalksandstein 1	27.07.2017 15:43:45	30.07.2017 19:59:10.8452
Auftrag_4	01.08.2017 05:38:57	02.08.2017 19:59:10.8452	Kalksandstein 1	02.08.2017 20:09:45	04.08.2017 23:55:10.8452	Kalksandstein 1		
Auftrag_5	02.08.2017 02:42:57	03.08.2017 23:44:58.8452	Kalksandstein 1					
Auftrag_6								

**Übersicht über die Kennwerte**

ID	Rüstdauer	Härtezeit	Wartezeit	Nutzungsgrad	Verpackungsblockade	DLZ	Strategie	AnzahlIAK
Originalergebnis	1:08:00:00.0000	10:09:15.7128	0.0000	0.357544991374834	0.0000	11:11:59:46.8452	Sortenreine Bestückung	5
Ergebnis vor Optimierung	1:08:00:00.0000	10:20:47.4351	0.0000	0.354639357092412	0.0000	11:11:59:46.8452	Sortenreine Bestückung	5

Bild 95: Ergebnis der Simulation zur Wirkungsermittlung

Anders verhält es sich bei der zweiten Planungsabweichung (s. Bild 94). Die Simulation zur Wirkungsermittlung stellt fest, dass der vorgegebene Grenzwert nicht eingehalten werden kann (vgl. Bild 96: ❶). Dank des Optimierungsverfahrens kann diese Abweichung gemildert werden (vgl. Bild 96: ❷). Dies wird durch die Abänderung der Reihenfolgeplanung an den Pressen erreicht. Zwei der drei Zusatzaufträge können auf vorhandene Aufträge aufgeschlagen werden (vgl. Bild 96: ❸/❹), der dritte wird jedoch als separater Auftrag integriert. Im Ergebnis kann die Gesamtrüstzeit aller Aufträge im Vergleich zum Verzicht auf eine Umplanung um rund 28 % reduziert werden (vgl. Bild 96: ❺). Dies wirkt sich auch auf die Gesamtdurchlaufzeit aus, die um rund 11 % verringert wird (vgl. Bild 96: ❻).

**Auftragsplanung vor Optimierung** Abweichung: 1,97725

Auftragsname	PresseBeginn	PresseEnde	PresseSteinsorte	Presse1Beginn	Presse1Ende	Presse1Steinsorte	Presse2Beginn	Presse2Ende
Auftrag_1	25.07.2017 02:26:57	30.07.2017 14:54:03.8452	Kalksandstein 7	24.07.2017 23:22:45	29.07.2017 06:25:00.8452	Kalksandstein 3	24.07.2017 22:43:15	27.07.2017 14:42:15
Auftrag_2	29.07.2017 13:46:57	01.08.2017 08:50:30.8452	Kalksandstein 7	27.07.2017 21:46:45	02.08.2017 23:04:58.8452	Kalksandstein 6	26.07.2017 10:42:15	29.07.2017 17:55:45
Auftrag_3	31.07.2017 08:42:57	02.08.2017 03:33:28.8452	Kalksandstein 8	01.08.2017 11:04:15	04.08.2017 00:09:02.8452	Kalksandstein 1	27.07.2017 17:55:45	30.07.2017 14:45:15
Auftrag_4	01.08.2017 09:38:57	02.08.2017 23:10:58.8452	Kalksandstein 1	03.08.2017 00:33:45	06.08.2017 02:24:44.8452	Kalksandstein 1	29.07.2017 14:45:15	01.08.2017 11:45:45
Auftrag_5	02.08.2017 06:42:57	04.08.2017 00:03:02.8452	Kalksandstein 1	04.08.2017 11:45:45	06.08.2017 02:36:44.8452	Kalksandstein 6		
Auftrag_6	03.08.2017 06:10:57	06.08.2017 02:18:44.8452	Kalksandstein 8					

**Auftragsplanung nach Optimierung** Abweichung: 0,4 Anzahl Änderungen: 2

Auftragsname	PresseBeginn	PresseEnde	PresseSteinsorte	Presse1Beginn	Presse1Ende	Presse1Steinsorte	Presse2Beginn	Presse2Ende
Auftrag_1	25.07.2017 02:26:57	30.07.2017 14:56:15.8452	Kalksandstein 7	24.07.2017 23:22:45	29.07.2017 07:13:32.8452	Kalksandstein 3	25.07.2017 02:13:15	27.07.2017 14:12:15
Auftrag_2	29.07.2017 13:46:57	01.08.2017 15:33:30.8452	Kalksandstein 7	27.07.2017 21:46:45	02.08.2017 23:05:02.8452	Kalksandstein 6	26.07.2017 14:12:15	29.07.2017 17:55:45
Auftrag_3	31.07.2017 08:42:57	02.08.2017 03:33:52.8452	Kalksandstein 8	01.08.2017 11:04:15	04.08.2017 00:08:58.8452	Kalksandstein 1	27.07.2017 17:55:45	30.07.2017 18:15:15
Auftrag_4	01.08.2017 09:38:57	02.08.2017 23:11:02.8452	Kalksandstein 1	03.08.2017 00:33:45	04.08.2017 23:55:10.8452	Kalksandstein 1	29.07.2017 18:15:15	01.08.2017 11:07:59:46.8452
Auftrag_5	02.08.2017 06:42:57	04.08.2017 00:02:58.8452	Kalksandstein 1					
Auftrag_6								

**Übersicht über die Kennwerte**

ID	Rüstdauer	Härtezeit	Wartezeit	Nutzungsgrad	Verpackungsblockade	DLZ	Strategie	AnzahlIAK
Originalergebnis	1:08:00:00.0000	9:58:14.6429	0.0000	0.358338147328265	0.0000	11:07:59:46.8452	Sortenreine Bestückung	5
Ergebnis vor Optimierung	2:10:30:00.0000	10:16:58.2692	0.0000	0.363081481882098	0.0000	12:16:31:22.8452	Sortenreine Bestückung	5
Ergebnis nach Optimierung	1:18:00:00.0000	10:00:44.0000	0.0000	0.385452482176547	0.0000	11:07:59:46.8452	Sortenreine Bestückung	4

Bild 96: Ergebnis des Rescheduling nach der zweiten Planabweichung

Das vorangegangene Fallbeispiel zeigt die Umsetzbarkeit und den korrekten Verfahrensablauf des Konzepts für das KS-Cockpit aus Kapitel 5. Das Rescheduling wird nur vorgenommen, wenn damit eine signifikante Verbesserung erzielt wird. Die Optimierung wird gar nur dann ausgeführt, wenn sich die Auswirkungen der Planabweichung als kritisch herausstellen.

Die Echtzeitanbindung, auf die im vorangegangenen Fallbeispiel aufgrund der bisher fehlenden Durchgängigkeit in den KS-Werken verzichtet werden muss, konnte exemplarisch anhand eines Produktionsbereichs getestet werden. Die auf dem OPC-UA-Server der SPS verfügbaren Datenpunkte werden anhand des im oberen Bildbereich von Bild 97 visualisierten Vorgehens mit der Simulation verknüpft. Im unteren Bildbereich ist die beispielhafte Integration der Echtzeitdaten in den jeweiligen Objektbaustein in Plant Simulation dargestellt. Punkt ❶ hebt die Echtzeitanbindung des realen Betriebszustands der Förderbänder zu den Pressen in das DES-Modell hervor. Die gelungene Datenmanipulation im Server der SPS aus der Simulation heraus ist unter Punkt ❷ dargestellt.

Letztlich bietet diese Datenanbindung auch die Möglichkeit, die Validierung und Verifikation des Simulationsmodells kontinuierlich auszuführen. Werden zu irgendeinem Zeitpunkt Abweichungen vom realen Prozess erkannt, kann der Nutzer auf eine erforderliche Anpassung des Modells hingewiesen werden oder diese Adaption automatisch veranlasst werden.

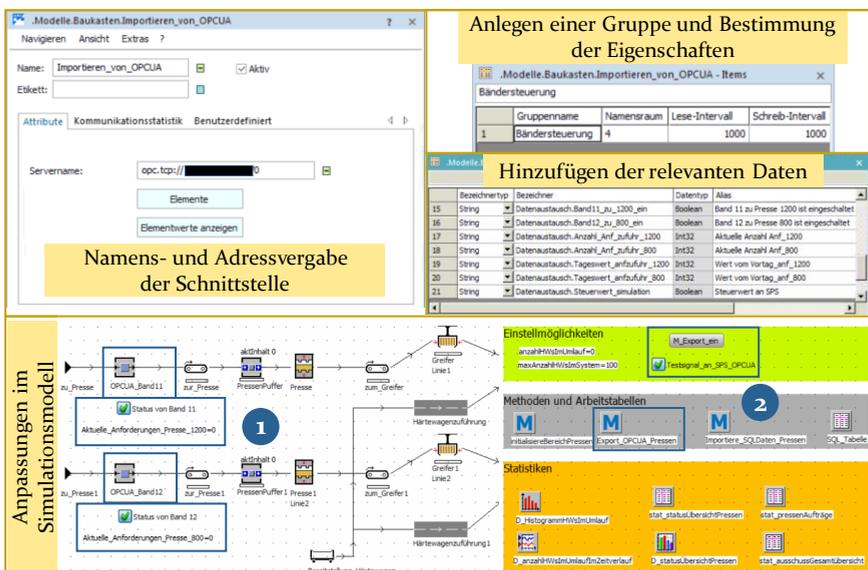


Bild 97: Realisierte Anbindung von Echtzeitdaten per OPC-UA-Schnittstelle

## 6.4 Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auf andere Anwendungen

Aufgrund der modularen Struktur und des generischen Aufbaus der einzelnen Komponenten weist die Gesamtmethodik mit der Simulation im Kern und aufgesetzten Optimierungsverfahren sowie angebotenen Echtzeitdaten eine hohe Übertragbarkeit auf andere Anwendungen auf. Im Bereich der Simulation ist insbesondere die Methodik zur Erstellung eines generischen Simulationsbaukastens sowie die laufzeiteffiziente, gemeinsame Modellierung von Schüttgut und Stückgut in einem DES-Modell auf andere Einsatzbereiche übertragbar. Gleiches gilt für die Energiesimulation des thermischen Verhaltens von Materialflussobjekten sowie die Modellierung des Autoklavierungsprozesses, sofern ein solcher Prozess vorliegt.

Für die Forschungsergebnisse mit Optimierungsbezug sind bei einem Transfer auf andere Anwendungen nur geringfügige Anpassungen in dem Verfahren zur Absatzplanung mittels SARIMA-Modellen sowie in der Methodik für ein bedarfsgerechtes Rescheduling durch vorherige simulationsbasierte Identifizierung kritischer Planabweichungen notwendig. Ebenso kann ein ähnliches Dekompositionsverfahren wie in Abschnitt 4.1.2 bei anderen Produktionsprozessen helfen, mehrere Fertigungsstufen integriert zu optimieren.

In Bezug auf die Echtzeitanbindung der simulationsgestützten Optimierung können auch in anderen Anwendungsfällen die Methodik und Architektur zur Übertragung simulationsrelevanter Daten sowie deren Rückführung (s. Abschnitt 5.2) verwendet werden. Insbesondere der Einsatz eines OPC-UA-Informationsmodells zur Anbindung der Produktion an die Simulation sollte aufgrund der aufwandsarmen semantischen Kopplung künftig verstärkt eingesetzt werden.

Als passend für eine Übernahme der Forschungsergebnisse erweisen sich besonders ähnliche Produktionsprozesse, die auch der hybriden Fertigung zuzuordnen sind (vgl. Abschnitt 2.1.3), speziell wenn sie Autoklavierungs- oder Ofenprozesse enthalten und parallele, starr verkettete Anlagen ohne Zwischenbestände vorliegen. Die Übertragbarkeit der erfüllten Forschungsbedarfe aus Abschnitt 2.5 auf diese Prozesse ist zusammenfassend in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auf andere Anwendungen

Erfüllte Forschungsbedarfe		Porenbetonstein	Ziegelstein	Flachglas	CFK	Backwaren	Andere Produktionsprozesse
F1	Bausteinbasiertes Referenzmodell für KS-Werke	●	◐	◑	◑	◑	◑
F2	Laufzeiteffiziente und valide Modellierung von Schüttgut und Stückgut in DES	●	●	◑	◑	◑	◑
F3	Abbildung des thermischen Verhaltens von Anlagen und Gütern in DES-Modellen	●	●	◑	◑	◑	●
F4	Modellierung eines Autoklavierungsprozesses in DES-Modellen	●	○	○	●	○	○
F5	Methodik zur Voraussimulation	●	●	●	●	●	●
F6	Methodik zur simulativen Bewertung von alternativen Auftragsplänen	●	◐	◑	◑	◑	◑
F7	SARIMA-Modell zur Prognose von Absatzmengen aus Vergangenheitsdaten	●	●	●	◑	◑	◑
F8	Kopplung von betriebsbegleitender Simulation und Optimierungsverfahren mittels Dekomposition	●	●	◑	◑	◑	◑
F9	Entwicklung von spezifischen Algorithmen	◐	◑	◑	◑	◑	◑
F10	Methodik zum automatisierten Rescheduling nur bei signifikanter Abweichung vom geplanten Produktionsablauf	●	●	●	●	●	●
F11	Selbstlernendes Optimierungssystem zur Modellpräzisierung	●	●	●	●	●	●
F12	Methodik und Architektur zur Echtzeitübertragung simulationsrelevanter Daten	●	◐	◑	◑	◑	◑
F13	Automatisierte Rückführung von Optimierungsergebnissen in Automatisierungssysteme	●	◐	◑	◑	◑	◑
F14	OPC-UA-Informationsmodell für die automatische Verknüpfung von Anlagen und Simulationsmodellen	●	●	●	●	●	●
F15	Ableitung kritischer Freiheitsgrade zur Optimierung der KS-Produktion	○	○	○	○	○	○
F16	Manuelle Eingriffe in die Auftragsregelung	●	●	●	●	●	●

- ≙ Forschungsergebnisse mit geringfügigen Anpassungen übertragbar
- ◐ ≙ Forschungsergebnisse mit größeren Anpassungen übertragbar
- ◑ ≙ Forschungsergebnisse im Ansatz übertragbar
- ≙ Forschungsergebnisse nicht unmittelbar übertragbar



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In Zeiten zunehmender Produktindividualisierung, Nachfragevolatilität und steigender Ressourcenpreise sind Unternehmen in ihrem Streben nach Effizienz mit einer manuell nur eingeschränkt beherrschbaren Komplexität konfrontiert. Auch Kalksandsteinwerke stehen vor der Aufgabe, mit ihren verketteten und äußeren Einflüssen unterlegenen Produktionssystemen flexibel zu reagieren, um in einem kompetitiven Markt wettbewerbsfähig zu bleiben. Da für eine effiziente Steuerung des Produktionsbetriebs eine Vielzahl an variierenden Einflussfaktoren fortwährend einzubeziehen ist, wird ein IT-basiertes Unterstützungssystem (KS-Cockpit) eingesetzt, das die Fertigungsabläufe unter Berücksichtigung dieser volatilen Einflüsse regelt.

Hierzu legt diese Arbeit ein Gesamtkonzept vor, das durch Integration von Simulations- und Optimierungsverfahren unter Einbezug von Echtzeitdaten einen produktionssynchronen, regelnden digitalen Zwilling der Materialflüsse des Produktionssystems generiert. Dieser ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung der Fertigungsabläufe sowie eine vorausschauende, optimale Reaktion auf Planabweichungen, die er im Bedarfsfall auch autonom vornehmen kann. Ein derartiger Ansatz, der die Produktion nicht mehr auf Basis von Plandaten steuert und bei Bedarf mit bereichsoptimalen Lösungen reagiert, sondern das Gesamtsystem durch Integration von Echtzeitdaten kontinuierlich regelt, liegt bisher nicht vor. Diese ganzheitliche Regelung wird durch Erweiterungen in den drei integrierten Kernkomponenten Simulation, Optimierungsverfahren und Echtzeitdatenverknüpfung ermöglicht.

Für die Komponente Simulation weist die KS-Herstellung Charakteristika auf, für die gewöhnliche Modellierungsansätze nicht ausreichen. Daher wird Schüttgut, um es laufzeiteffizient in einer ereignisdiskreten Simulation behandeln zu können, prozessgerecht diskretisiert. Auch das thermische Verhalten der Güter und Anlagen nimmt maßgeblichen Einfluss auf den Materialfluss. Mithilfe einer Methodik zur Aktualisierung der thermischen Zustände der Güter im Prozessverlauf sowie einer geeigneten Modellierung der thermodynamischen Wechselwirkungen im Härteprozess kann diese Abhängigkeit hinreichend genau in der Simulation berücksichtigt werden. Zur Erreichung einer hohen Nutzerakzeptanz dient das Aufstellen eines Referenzprozesses für die KS-Herstellung, aus dem eine generisch modellierte Bausteinbibliothek hervorgeht. Mit dieser kann der Nutzer in wenigen Schritten jegliches Werk instanzieren und dieses bei Bedarf auch

mit individuellen Spezifika versehen. Durch diesen ersten Teil der Forschungsarbeit sind die Anforderungen A<sub>1</sub>-A<sub>6</sub> aus Kapitel 1 erfüllt.

Auch für die Komponente Optimierungsverfahren ist die Simulation ein wesentlicher Bestandteil, da sie den Kern aller Berechnungen darstellt. Dank simulationsgestützter Optimierung gelingt es, zeitdynamische Abhängigkeiten bei der Ergründung optimaler Abläufe umfangreich zu berücksichtigen und dabei auch das Produktionssystem als Ganzes ohne exorbitante Laufzeiten in einem hohen Detailgrad zu betrachten. Diesem Zweck dient auch der Einsatz von Dekompositionsverfahren zur Optimierung des Gesamtablaufs. Hierdurch werden Einzellösungen für den Pressen-, Autoklaven-, Verpackungs- und Mischereibereich generiert, die durch gegenseitige Weitergabe von Restriktionen ideal aufeinander abgestimmt sind. Die hierbei verwendeten Algorithmen sind modular im Simulationsmodell implementiert, damit sie nur bei Bedarf eingebunden oder auch durch alternative Verfahren ersetzt werden können. Um diesen Planungsprozess auf einer fundierten Grundlage aufzusetzen, werden für KS-Werke zugeschnittene SARIMA-Modelle zur Prognose der Absätze eingesetzt.

Damit der Einsatz des KS-Cockpit die Planstabilität nicht beeinträchtigt, dient die Simulation auch zur Wirkungsermittlung bei Planabweichungen. Nur wenn diese signifikanten Einfluss auf den Fertigungsablauf nehmen, wird ein Optimierungslauf gestartet und dessen Ergebnis umgesetzt. Da beim kurzfristigen Einsatz von Optimierungssystemen entscheidend ist, dass das Ergebnis zum Zeitpunkt der Entstehung direkt umgesetzt werden kann und auch nicht obsolet ist, errechnet eine Voraussimulation vorab den Zustand des Produktionssystems beim Vorliegen des Optimierungsergebnisses und übergibt ihn als Input an die Optimierungsläufe. Selbstlernende Verfahren stellen sicher, dass dieser Zeitpunkt möglichst exakt getroffen wird. Durch die vorgenannten Lösungen sind die Anforderungen A<sub>7</sub>-A<sub>16</sub> erfüllt.

Für einen operativen Einsatz der simulationsgestützten Optimierung zur proaktiven Regelung der Fertigungsabläufe wird das zugrundeliegende Modell mittels Echtzeitdaten zum Zeitpunkt der Berechnungen auf den aktuellen Stand der realen Fertigung gesetzt. Eine hierfür erforderliche Methodik sowie der intensive Einsatz der betriebsbegleitenden simulationsgestützten Optimierung ist in dieser Form bislang in der Fachliteratur nicht zu finden. Auch die aufgezeigte technische Anbindung der Daten an das Simulationstool einschließlich der direkten Rückführung der Simulationsergebnisse in die SPS stellt eine Neuerung dar. Dank der Einrichtung eines

OPC-UA-Informationsmodells ist gewährleistet, dass die Anbindung an die Simulation automatisiert erfolgen kann. Trotz Entlastung in der Konfiguration des Modells ist der Mensch weiter als Entscheidungsträger vorgesehen, dem die ausgeprägte Visualisierungsfähigkeit von Simulationen zugutekommt, wenngleich das KS-Cockpit durch vorherige Parametrisierung auch autonom arbeiten kann. Die voran aufgezeigten Lösungen genügen den verbleibenden Anforderungen A17-A23.

In Form des KS-Cockpit ist erstmalig eine Methodik aufgezeigt, wie Fertigungsabläufe auf Basis von Echtzeitdaten ganzheitlich optimiert werden können, indem die Simulation als digitaler Zwilling die Kernfunktion bei der proaktiven und reaktiven Regelung einnimmt. Durch die Kombination von Simulations- und Optimierungsverfahren aufsetzend auf dem aktuellen Produktionszustand ermöglicht sie bereits eine optimierte Selbststeuerung des Produktionssystems. Unter Einbezug thermischer Wechselwirkungen und weiterer Spezifika der KS-Herstellung lässt sich die Eignung für diesen spezifischen Prozess nachweisen. Dank des generischen Aufbaus der Methodik ist eine Übertragbarkeit auf weitere Prozesse ebenso gegeben. Demnach sollte dieses Unterstützungssystem aufgrund der Reaktionsfähigkeit, der kontinuierlichen Optimierung der Abläufe sowie der Steigerung der Ressourceneffizienz auch in weiteren Industriezweigen ausgerollt werden. Die Forschungsaufgabe kann somit als gelöst angesehen werden.

Zur Erhöhung der Resilienz kann das KS-Cockpit in Folgearbeiten um zusätzliche Komponenten erweitert werden. So erscheint die Modellierung des Härteprozesses in der Simulation mithilfe von maschinellen Lernverfahren aufsetzend auf erfassten Realdaten aussichtsreich (vgl. [P15]), um die komplexe Modellerstellung zu vereinfachen und zugleich menschliche Eingriffe aus der Realität einzubeziehen. Hierzu ist eine detaillierte Erfassung der relevanten Sensorwerte in den Werken erforderlich. Durch Integration des Werkzeugverschleißes an den Pressen, beispielsweise mittels sensordatenbasierter maschineller Lernverfahren zur Prognose der Abnutzungsgrenze, lässt sich die Losgrößenoptimierung realitätsnäher und das Rescheduling proaktiver gestalten, da die Verschleißgrenzen überwacht, antizipiert und in das Modell einbezogen werden.

Eine Kopplung der Härteprozesssteuerung mit dem KS-Cockpit kann zudem zu einer weiteren Steigerung der Energieeffizienz bei der Autoklavierung führen. Sie ermöglicht die Berücksichtigung der umliegenden Prozessschritte in der Steuerungslogik des Dampfsystems, sodass Entscheidungen in Bezug auf die Dampfüberleitung mit einer Vorausschau auf

künftige Härteaufträge erfolgen können. Hierzu ist mithilfe der betriebsbegleitenden Simulation der zukünftige Prozessverlauf in den umliegenden Bereichen um die Autoklaven zu ermitteln. Aus diesen Informationen werden dann über eine Schnittstelle die Zeitpunkte der vollständigen Befüllung beziehungsweise Entladung der Härtekessel an den Leitreechner des Härteprozesses übertragen.

Für den Einsatz des KS-Cockpit sind in den Werken die technischen Voraussetzungen zu schaffen, um die entwickelte Methodik zu implementieren. Neben der Anschaffung entsprechender Anwendersoftware und der Einrichtung von Schnittstellen für den Echtzeitdatentransfer ist hierzu insbesondere Know-how zur Bedienung der simulationsgestützten Optimierung aufzubauen. Nach einer dedizierten Abbildung der Werksprozesse in der Simulation und Verknüpfung mit den erfassten Echtzeitdaten ist das Unterstützungssystem verwendbar. Auf Basis dieser Umsetzung können durch Feldstudien schließlich valide Aussagen über die Wirksamkeit der in dieser Arbeit entwickelten Methodik in Bezug auf die Ressourceneffizienz in einem Kalksandsteinwerk getroffen werden.

Zur weiteren Vereinfachung der Umsetzung sollten Fertigungsplaner sowie Anbieter von Automatisierungstechnik anstreben, nicht nur für die Entwicklungs- und Inbetriebnahmephase eine übergangslose Kopplung zwischen Hardware und Simulationssoftware einzurichten. Diese sollte vielmehr so aufgesetzt werden, dass sie auch in der Betriebsphase aufrechterhalten ist. Aufgrund des Wegfalls der manuellen Konfigurationsarbeit stellt dies einen wesentlichen Befähiger für die Etablierung von digitalen Zwillingen für Materialflusssysteme dar.

## 8 Summary and Outlook

In times of increasing product individualization, demand volatility and rising resource prices, companies in their quest for efficiency are confronted with a complexity that can only be controlled to a limited extent manually. Calcium silicate masonry plants are likewise faced with the task of reacting flexibly with their concatenated production systems that are subject to external influences, in order to remain competitive in the market. Since a large number of varying influencing factors must be continuously taken into account for the efficient control of production operations, an IT-based support system (KS cockpit) is used to regulate production processes in consideration of these volatile influences.

This dissertation presents an overall concept that generates a production-synchronous, regulating digital twin of the material flows of the production system through the integration of simulation and optimization processes, including real-time data. This enables continuous monitoring of the production processes as well as a predictive, optimal reaction to plan deviations, which can also be carried out autonomously in case of need. Such an approach, which no longer controls production on the basis of planning data and, when required, reacts with solutions that are optimal for the specific area, but instead continuously regulates the entire system by integrating real-time data, has not been available to date. This holistic control is enabled by extensions in the three integrated core components simulation, optimization and real-time data connection.

For the simulation component, there are characteristics of calcium silicate masonry production for which conventional modelling approaches are not sufficient. Therefore, bulk material is discretized according to the process in order to be able to handle it efficiently in an discrete event simulation. Likewise, the thermal behaviour of goods and plants has a decisive influence on the material flow. With the aid of a methodology for updating the thermal states of the goods during the process and a suitable modelling of the thermodynamic interactions in the hardening process, this dependency can be taken into account in sufficient detail in the simulation. In order to achieve a high user acceptance, a reference process for the production of calcium silicate masonry units is set up, from which a generically modelled module library is derived. With this library, the user can instantiate any plant in very few steps and, if required, add individual specifics.

Simulation is also a significant element for the optimization method component, as it represents the core of all calculations. Due to simulation-

based optimization, it is possible to take time-dynamic dependencies into account extensively when determining optimal processes and to consider the production system as a whole in a high degree of detail without exorbitant runtimes. The use of decomposition techniques to optimize the overall process also serves this purpose. This generates individual solutions for the press, autoclave, packaging and mixing areas, which are ideally matched to each other by mutual propagation of restrictions. The algorithms used here are implemented modularly in the simulation model so that they can only be integrated if necessary or can also be replaced by alternative algorithms. In order to base this planning process on a solid foundation, SARIMA models customized for calcium silicate masonry plants are used to forecast sales.

To ensure that the operation of the KS cockpit does not impair the planning stability, the simulation also serves to determine the effects of deviations from the plan. Only if these have a significant influence on the production process will an optimization run be executed. Since it is decisive for the short-term use of optimization systems that the result can be directly implemented at the time of its occurrence and is not obsolete, a preliminary simulation calculates the state of the production system in advance for the time when the optimization result is available and transfers it as input to the optimization runs. Self-learning procedures ensure that this point in time is met as accurately as possible.

For an operational use of simulation-based optimization for the proactive control of production processes, the underlying model is set to the current status of real production using real-time data at the time of the calculations. A methodology for this as well as the intensive use of simulation-based optimization during operation has not yet been found in this form in the scientific literature. The technical connection of the data to the simulation tool including the direct feedback of the simulation results to the PLC is a further innovation. By setting up an OPC UA information model, the connection to the simulation can be automated. Despite the relief in the configuration of the model, the operator is still intended to be the decision-maker, who benefits from the distinct visualization capability of simulations, even though the KS cockpit can also work autonomously through prior parameterization.

With the KS cockpit, for the first time a methodology has been presented demonstrating how production processes can be optimized holistically on the basis of real-time data by using simulation as a digital twin representing

the core function in proactive and reactive control. Through the combination of simulation and optimization methods, based on the current production status, it already enables an optimized self-control of the production system. By including thermal correlations and other specifics of calcium silicate masonry unit production, the suitability for this specific process can be demonstrated. Due to the generic structure of the methodology, it can also be transferred to other processes. Accordingly, this support system should also be rolled out in other branches of industry on account of its responsiveness, the continuous optimisation of processes and the increase in resource efficiency. The research task can therefore be deemed to have been solved.

In order to increase resilience, the KS cockpit can be extended by additional components in subsequent projects. The modelling of the hardening process in the simulation with the help of machine learning methods based on recorded real data seems promising for simplifying the complex model generation and including human interventions from reality. This requires a detailed recording of the relevant sensor values in the plants. By integrating tool abrasion at the presses, for example by means of sensor data based machine learning algorithms for predicting the abrasion limit, batch size optimization can be made more realistic and rescheduling more proactive, since the abrasion limits are monitored, anticipated and included in the model.

Linking the hardening process control with the KS cockpit can further increase energy efficiency in autoclaving. It enables the adjacent process steps to be taken into account in the control routines of the steam system so that decisions relating to steam transfer can be made with a preview of future hardening orders. For this purpose, the future process flow in the adjacent areas around the autoclaves is to be determined with the aid of the online simulation. From this information, the times of the complete filling or unloading of the hardening vessels are transferred via an interface to the host computer of the hardening process.

For the deployment of the KS cockpit, the technical requirements have to be provided in the plants in order to implement the developed methodology. In addition to the purchase of appropriate user software and the setup of interfaces for real-time data transfer, special know-how for the application of the simulation-based optimization has to be developed. The support system can be utilized after a dedicated modeling of the plant processes in the simulation and linking with the recorded real-time data. On the basis of this implementation, field studies can finally make validity assessments

about the effectiveness of the methodology developed in this thesis with regard to resource efficiency in a calcium silicate masonry plant.

To further simplify conversion, production planners and providers of automation technology should strive to set up a seamless linking between hardware and simulation software not only for the development and commissioning phase. Rather, it should be set up in a way that it can also be maintained during the operating phase. Due to the elimination of manual configuration work, this represents an essential enabler for the establishment of digital twins for material flow systems.

## Literaturverzeichnis

- [1] BAUERNHANSL, T., J. KRÜGER, G. REINHART und G. SCHUH. *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*. Darmstadt, Juni 2016
- [2] VAHRENKAMP, R. *Von Taylor zu Toyota. Rationalisierungsdebatten im 20. Jahrhundert*. 2., korrigierte und erweiterte Auflage. Lohmar, Köln: Eul Verlag, März 2013. ISBN 9783844102376
- [3] KAGERMANN, H., W. WAHLSTER und J. HELBIG. *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern*. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Frankfurt/Main, April 2013
- [4] BAUERNHANSL, T., M. ten HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN 9783658046811
- [5] KURBEL, K.E. *Enterprise Resource Planning and Supply Chain Management. Functions, Business Processes and Software for Manufacturing Companies*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, 2013. Progress in IS. ISBN 3642315739
- [6] DR. BERNHARDI, ANTON [SEN.]. *Anleitung zur Kalkziegelfabrikation und zum Kalkziegelbau (Patentschrift)*. Erfinder: A. BERNHARDI, SEN. Anmeldung: o. J. (um 1854). Deutschland
- [7] GUNDLACH, H. *Kalksandstein-Technologie. Teil II. TIZ - Fachberichte*, 1978, **102**(7), S. 402-405
- [8] GUNDLACH, H. *Kalksandstein-Technologie. Teil V: Herstellung der Rohmischung. TIZ - Fachberichte Rohstoff-Engineering*, 1980, **104**(2), S. 98-104
- [9] HAYNES, W.M. und D.R. LIDE, Hg. *CRC handbook of chemistry and physics. A ready-reference book of chemical and physical data*. 94.

- ed., 2013 - 2014. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2013.  
ISBN 9781466571143
- [10] OATES, J.A.H. *Lime and limestone. Chemistry and technology, production and uses*. Weinheim, Federal Republic of Germany: Wiley-VCH, 1998. ISBN 9783527612024
- [11] GUNDLACH, H. *Dampfgehärtete Baustoffe*. Wiesbaden: Bauverlag, 1973. ISBN 9783762503514
- [12] EDEN, W. *Einfluss der Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen auf die Scherbenrohdichte von Kalksandsteinen. Influence of the compaction of calcium silicate raw materials on the structural density of calcium silicate masonry units*. Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2010. Kassel: Univ. Press, 2011. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau. 15. ISBN 9783862190409
- [13] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 771-2: 2015-11, *Festlegungen für Mauersteine - Teil 2: Kalksandsteine*. Berlin: Beuth Verlag
- [14] GUNDLACH, H. Kalksandstein-Technologie. Teil VIII: Innerbetrieblicher Transport der Rohlinge und der gehärteten Steine. *TIZ - Fachberichte Rohstoff-Engineering*, 1983, **107**(11), S. 812-813
- [15] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. *Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung)*. *BetrSichV*, 03.02.2015 (BGBl. I S. 49) - zuletzt durch Artikel 5 Absatz 7 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert
- [16] SCHMIDT, E. *VDI-Wasserdampf tafeln. Bis 800°C und 1000 at / up to 800°C and 1000 at / jusqu'à 800°C et 1000 at / hasta 800°C y 1000 at / von Ernst Schmidt*. Siebente, neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1968. ISBN 3662247763
- [17] GUNDLACH, H. Kalksandstein-Technologie. Teil IX: Die Dampfhärtung. *TIZ - Fachberichte Rohstoff-Engineering*, 1984, **108**(5,6,10), S. 299-302,387-391,654-656

- [18] EDEN, W. und W.-D. STEINMANN. *Reduzierung des Energieverbrauchs und der produktionstechnisch bedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Kalksandstein-Herstellung durch energietechnische Optimierungsmaßnahmen*. Forschungsbericht Nr. 112 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV. Hannover, 2010
- [19] EDEN, W. *Einfluss der Unterbrechung des hydrothermalen Härteprozesses auf die Qualitätseigenschaften, optimale Härtung von Kalksandsteinen*. Forschungsbericht Nr. 90 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV. Hannover, 2000
- [20] EDEN, W., A. VAN BRIEL, H. MÜLLER und S. WOLFRAM. *Maßnahmen zur Energieeinsparung bei der Kalksandstein-Produktion*. Forschungsbericht Nr. 104 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV. Hannover, 2007
- [21] BUDNIKOV, P.P. und N.W. PETROVIYCH. Der Einfluß der Dispersität der Masse und der Härtungstemperatur auf den Bildungsprozeß und die Eigenschaften von silicatischen Baustoffen. *Proceedings des Moskauer chemisch-technischen Instituts Mendeleev*, 1957, (24), S. 96-110
- [22] GARBEV, K. *Struktur, Eigenschaften und quantitative Rietveldanalyse von hydrothermal kristallisierten Calciumsilikathydraten (CSH-Phasen)*. Dissertation. Karlsruhe, 2004
- [23] GUNDLACH, H. Kalksandstein-Technologie. Teil III und IV. *TIZ - Fachberichte Rohstoff-Engineering*, 1979, **103**(4), S. 211-213
- [24] GUNDLACH, H. Kalksandstein-Technologie. Teil VI: Förderung der Rohstoffe. *TIZ - Fachberichte Rohstoff-Engineering*, 1982, **106**(11), S. 760-768
- [25] GUNDLACH, H. Kalksandstein-Technologie. Teil VII: Formgebung und Verdichtung der Rohmischung. *TIZ - Fachberichte Rohstoff-Engineering*, 1983, **107**(6), S. 415-419

- [26] DYCKHOFF, H. und T. SPENGLER. *Produktionswirtschaft. Eine Einführung*. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 9783642136832
- [27] CORSTEN, H. und R. GÖSSINGER. *Produktionswirtschaft. Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*. 14., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: DE GRUYTER OLDENBOURG, 2016. Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre. ISBN 9783110452778
- [28] DENNIS, D. und J. MEREDITH. An Empirical Analysis of Process Industry Transformation Systems [online]. *Management Science*, 2000, **46**(8), S. 1085-1099. ISSN 0025-1909. Verfügbar unter: doi:10.1287/mnsc.46.8.1085.12031
- [29] FRIEMANN, F., M. GRAM, P. SCHÖNSLEBEN und H. BIEDERMANN. Einflussfaktoren und Ausrichtung von Produktionsstrukturen in der Prozessindustrie. *Wing Business*, 2015, **2015**(1), S. 30-35
- [30] LASCO UMFORMTECHNIK GMBH. *Typenreihen KSP und PSP*. Coburg, Februar 2013
- [31] STATISTISCHES BUNDESAMT. *Klassifikation der Wirtschaftszweige. Mit Erläuterungen*. Wiesbaden, Dezember 2008. WZ 2008
- [32] HOMANN, M., H. WEBER und H. HULLMANN. *Porenbeton-Handbuch. Planen und Bauen mit System*. 6. Aufl. [grundlegend überarb.]. Gütersloh: Bauverl., 2008. ISBN 978-3-7625-3626-0
- [33] WESCHE, K. *Baustoffe für tragende Bauteile. Band 2: Beton, Mauerwerk (Nichtmetallisch-anorganische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit*. 3., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1993. ISBN 9783322801883
- [34] GRÜBL, P., H. WEIGLER und S. KARL. *Beton. Arten, Herstellung und Eigenschaften*. 2. Aufl. Berlin: Ernst, 2001. Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau. ISBN 3433013403

- [35] PESENDORFER, R. *Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von Ziegelwerken in Abhängigkeit zu ihrer Werksleistung*. Diplomarbeit. Mittweida, 2011
- [36] SINGER, F., S.S. SINGER und K. ZIMMERMANN. *Massen, Glasuren, Farbkörper, Herstellungsverfahren*. Berlin: Springer, 1969. Industrielle Keramik. Übers. von Kurt Zimmermann; Bd. 2. ISBN 9783642929892
- [37] SCHINDLER, I. und C. RONNER. *STAND DER TECHNIK BEI DER GLASHERSTELLUNG*. Wien, 1999
- [38] SCHAEFFER, H.A. und R. LANGFELD. *Werkstoff Glas. Alter Werkstoff mit großer Zukunft*. Berlin: Springer Vieweg, 2014. Technik im Fokus. ISBN 978-3-642-37230-8
- [39] BROSINGER, A. *Zu CFK-Produktionsformen aus Faserverbunden mit Oberflächenschutz aus thermisch gespritzter Metallschicht*. Dissertation. Braunschweig, 23. April 2007
- [40] CHERIF, C. *Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-17991-4
- [41] LÜTJEN, M. *Modellierungskonzept zur integrierten Planung und Simulation von Produktionsszenarien entwickelt am Beispiel der CFK-Serienfertigung*. Dissertation. Bremen, 17. Februar 2014
- [42] LÄSSIG, R., M. EISENHUT und A. MATHIAS. *Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*, September 2012. Studie Roland Berger
- [43] SEIBEL, W. und G. SPICHER. Backwaren. In: R. HEISS, Hg. *Lebensmitteltechnologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991, S. 167-180. ISBN 978-3-662-08284-3
- [44] SCHÜNEMANN, C. und G. TREU. *Technologie der Backwarenherstellung. Fachkundliches Lehrbuch für Bäcker und Bäckerinnen*. 10., überarb. Aufl. Alfeld/Leine: Gildebuchverl., 2009. ISBN 3773401507

- [45] BUNDESVERBAND KALKSANDSTEININDUSTRIE E.V. *Kalksandstein. Geschäftsberichte 2017/2018*, 05-2018
- [46] WIGHT, O.W. *MRP II: unlocking America's productivity potential*. O. Wight Ltd. Publications, 1981
- [47] RASHID, M.A., L. HOSSAIN und J.D. PATRICK. The Evolution of ERP Systems. In: F.F.-H. NAH, Hg. *Enterprise resource planning solutions and management*. Hershey: IRM Press, 2002, S. 1-16. ISBN 9781931777063
- [48] CLAUS, T., F. HERRMANN und M. MANITZ. Knappe Kapazitäten und Unsicherheit — Analytische Ansätze und Simulation in der Produktionsplanung und -steuerung. In: T. CLAUS, F. HERRMANN und M. MANITZ, Hg. *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 3-6. ISBN 978-3-662-43541-0
- [49] STADTLER, H. und C. KILGER, Hg. *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-74511-2
- [50] WERNER, H. *Supply Chain Management*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. ISBN 978-3-8349-3259-4
- [51] SCHUH, G. und V. STICH. *Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS*. 4., überarbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2012. ISBN 9783642254222
- [52] LÖDDING, H. *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-662-48458-6
- [53] SCHMIDT, J. *Integrierte Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung auf Basis von Zustandsinformationen*. Dissertation
- [54] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 5600 Blatt 1: 2016-10, *Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems - MES)*. Berlin: Beuth

- [55] KLETTI, J. *MES - Manufacturing Execution System*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN 978-3-662-46901-9
- [56] CLAUS, T., F. HERRMANN und M. MANITZ, Hg. *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN 978-3-662-43541-0
- [57] KUPRAT, T., J. MAYER und P. NYHUIS. Aufgaben der Produktionsplanung im Kontext von Industrie 4.0. *Industrie 4.0 Management*, 2015, **31**(2), S. 11-14
- [58] LIKER, J. *Toyota Way*. Blacklick, USA: McGraw-Hill Professional Publishing, 2003. ISBN 0071435638
- [59] VIEIRA, G.E., J.W. HERRMANN und E. LIN. Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies Policies and Methods [online]. *Journal of Scheduling*, 2003, **6**(1), S. 39-62. ISSN 10946136. Verfügbar unter: doi:10.1023/A:1022235519958
- [60] FLEISCHMANN, B. und H. MEYR. Planning Hierarchy, Modeling and Advanced Planning Systems. In: A.G.d. KOK, Hg. *Handbooks in operations research and management science*. Amsterdam: North-Holland, 1995-, S. 455-523. ISBN 9780444513281
- [61] KUHN, A. und B. HELLINGRATH. *Supply Chain Management. Optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. ISBN 9783540654230
- [62] MÄRZ, L., W. KRUG, O. ROSE und G. WEIGERT, Hg. *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. VDI-Buch. 130. ISBN 9783642145353
- [63] TRENTESAUX, D. Distributed control of production systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, **22**(7), S. 971-978
- [64] MEISSNER, H., R. ILSSEN und J.C. AURICH. Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0 [online]. *Procedia CIRP*, 2017, **62**, S. 165-169. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2016.06.113

- [65] SCHUH, G., V. STICH, C. REUTER, M. BLUM, F. BRAMBRING, T. HEMPEL, J. RESCHKE und D. SCHIEMANN. Cyber physical production control. In: S. JESCHKE, C. BRECHER, H. SONG und D.B. RAWAT, Hg. *Industrial internet of things. Cybermanufacturing systems*, 2016, S. 519-539. ISBN 9783319425597
- [66] BURGGRAF, P., J. WAGNER und B. KOKE. Artificial intelligence in production management. A review of the current state of affairs and research trends in academia. In: *2018 International Conference on Information Management and Processing (ICIMP)*: IEEE, 2018, S. 82-88. ISBN 978-1-5386-3656-5
- [67] LEITÃO, P. Agent-based distributed manufacturing control [online]. A state-of-the-art survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, 22(7), S. 979-991 [Zugriff am: 13. April 2018]. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.engappai.2008.09.005
- [68] AUERBACH, T., F. BAUHOFF, M. BECKERS, D. BEHNEN, C. BRECHER, T. BROSZE, G. BUCHHOLZ, C. BÜSCHER, B. CORVES, U. EPELT, M. ESSER, D. EWERT, K. FAYZULLIN, R. FREUDENBERG, P. FRITZ, S. FUCHS, Y.-S. GLOY, T. GRIES, S. HAAG, E. HAUCK, W. HERFS, N. HERING, M. HÜSING, M. ISERMANN, M. JANSSEN, S. JESCHKE, B. KAUSCH, T. KEMPF, F. KLOCKE, S. KRATZ, S. KUZ, P. LOOSEN, J. LOSE, A. MALIK, M.P. MAYER, W. MICHAELI, T. MOLITOR, R. MÜLLER, S. MÜLLER, B. ODENTHAL, A. PAVIM, D. PETRING, R. POPRAWA, T. POTENTE, N. PYSCHNY, U. REISGEN, A. REßMANN, M. RIEDEL, H. SCHENUIT, D. SCHILBERG, C.M. SCHLICK, R. SCHMITT, G. SCHUH, W. SCHULZ, M. SCHÜRMEYER, J. SCHÜTTLER, U. THOMBANSEN, D. VESELOVAC, M. VETTE, C. WAGELS, K. WILLMS, M. LAASS und S. RUNGE. Selbstoptimierende Produktionssysteme. In: C. BRECHER, Hg. *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 747-1057. ISBN 978-3-642-20693-1

- [69] LAU, C. *Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung*: Herbert Utz Verlag, 2010. 238
- [70] BEIER, J. *Simulation approach towards energy flexible manufacturing systems*. Cham: Springer, 2017. Sustainable production, life cycle engineering and management. ISBN 3319466399
- [71] SCHUH, G., J.-P. PROTE, M. LUCKERT, F. SAUERMANN und K. THOMAS. Energieflexible Produktionsplanung und -steuerung [online]. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2017, **112**(12), S. 857-859. ISSN 0947-0085.  
Verfügbar unter: doi:10.3139/104.111848
- [72] KOHL, J. *Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik*. Bamberg: Meisenbach GmbH Verlag, 2016. Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. 282.  
ISBN 978-3-87525-406-8
- [73] SCHUH, G. und V. STICH, Hg. *Produktionsplanung und -steuerung 2. Evolution der PPS*. 4., überarbeitete Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2012. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-25426-0
- [74] KÁDÁR, B., A. PFEIFFER und L. MONOSTORI. Discrete event simulation for supporting production planning and scheduling decisions in digital factories. In: *Proceedings of the 37th CIRP international seminar on manufacturing systems*, 2004, S. 444-448
- [75] PFEIFFER, A. *Novel methods for decision support in production planning and control*. Dissertation. Budapest, 2007
- [76] SCHUH, G., T. POTENTE, A. HAUPTVOGEL, C. THOMAS und C. MÜLLER. Wertstromorientierte Konfiguration der Produktionssteuerung durch webbasierte Simulation. In: W. DANGELMAIER, C. LAROQUE und A. KLAAS, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik. Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung*. Tagungsband zur 15. ASIM-Fachtagung. Paderborn: Heinz-

- Nixdorf-Inst. Univ. Paderborn, 2013, S. 651-660.  
ISBN 9783942647359
- [77] BACKHAUS, K., B. ERICHSON, W. PLINKE und R. WEIBER. *Multivariate Analysemethoden*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-662-46075-7
- [78] MERTENS, P. und S. RÄSSLER. *Prognoserechnung*. 7. Auflage. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2012. ISBN 978-3-7908-2796-5
- [79] BOX, G.E.P., G.M. JENKINS, G.C. REINSEL und G.M. LJUNG. *Time series analysis. Forecasting and control*. Fifth edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2016. Wiley Series in Probability and Statistics. ISBN 1118674928
- [80] CRONE, S.F. *Neuronale Netze zur Prognose und Disposition im Handel*. Wiesbaden: Gabler, 2010. ISBN 978-3-8349-1174-2
- [81] WEIß, M., S. KIENER, N. MAIER-SCHEUBECK und R. OBER-MAIER. *Produktionsmanagement*. 11. Auflage: DE GRUYTER OLDENBOURG, 2018. ISBN 978-3-11-044342-4
- [82] PEPELS, W. *Marketingforschung und Absatzprognose*. Wiesbaden: Gabler Verlag; Imprint, 1995. Praxis der Unternehmensführung. ISBN 3409135146
- [83] MEFFERT, H., C. BURMANN und M. KIRCHGEORG. *Marketing. Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung Konzepte - Instrumente - Praxisbeispiele*. 11., überarb. u. erweiterte Aufl. 2012. Wiesbaden: Springer Gabler, 2012. SpringerLink : Bücher. ISBN 9783834927606
- [84] KILGER, C. und M. WAGNER. Demand Planning. In: H. STADTLER und C. KILGER, Hg. *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 133-160. ISBN 978-3-540-74511-2
- [85] BROCKHOFF, K. *Prognoseverfahren für die Unternehmensplanung*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1977. Die Wirtschaftswissenschaften Neue Reihe. 1. ISBN 3322861562

- [86] DÖHRN, R. *Konjunkturdiagnose und -prognose*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-642-36496-9
- [87] CHATFIELD, C. *The analysis of time series. An introduction*. 5. ed. London: Chapman & Hall, 1996. Texts in statistical science. ISBN 0412716402
- [88] HASTIE, T., R. TIBSHIRANI und J. FRIEDMAN. *The Elements of Statistical Learning*. New York, NY: Springer New York, 2009. ISBN 978-0-387-84857-0
- [89] KIENER, S., N. MAIER-SCHEUBECK, R. OBERMAIER und M. WEISS, Hg. *Produktionsmanagement. Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung*. 11., verbesserte und erweiterte Auflage. Berlin: DE GRUYTER OLDENBOURG, 2018. ISBN 9783110467710
- [90] BETGE, D., Hg. *Koordination in Advanced Planning and Scheduling-Systemen*. s.l.: DUV Deutscher Universitäts-Verlag, 2006. Produktion und Logistik. ISBN 978-3-8350-0199-2
- [91] TRAUTMANN, N. Anlagenbelegungsplanung in der Prozeßindustrie. In: P. CHAMONI, R. LEISTEN, A. MARTIN, J. MINNEMANN und H. STADTLER, Hg. *Operations Research Proceedings 2001. Selected Papers of the International Conference on Operations Research (OR 2001) Duisburg, September 3-5, 2001*. Berlin: Springer, 2002, S. 483-490. ISBN 978-3-540-43344-6
- [92] FRIEDRICH, S. Stand der IT-Unterstützung für das Supply Chain Management in der Prozessindustrie. In: T.S. SPENGLER, S. VOß und H. KOPFER, Hg. *Logistik-Management. Prozesse, Systeme, Ausbildung ; mit 55 Tabellen*. Heidelberg: Physica-Verl., 2004, S. 145-159. ISBN 978-3-7908-0121-7
- [93] MARCZINSKI, G. APS – Fortschrittliche Planung und Steuerung [online]. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2004, **99**(12), S. 720-724. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.100824

- [94] MEYR, H., M. WAGNER und J. ROHDE. Structure of Advanced Planning Systems. In: H. STADTLER und C. KILGER, Hg. *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 109-115. ISBN 978-3-540-74511-2
- [95] RINNOOY KAN, A.H.G. *Machine scheduling problems. Classification, complexity and computations*. The Hague: Nijhoff, 1976. ISBN 9024718481
- [96] PINEDO, M. *Scheduling. Theory, algorithms, and systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995. Prentice Hall international series in industrial and systems engineering. ISBN 0137067577
- [97] CONWAY, R.W., W.L. MAXWELL und L.W. MILLER. *Theory of scheduling*. Mineola, N.Y.: Dover, 2003. ISBN 0486428176
- [98] BRUCKER, P. *Scheduling Algorithms*. Fourth edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. ISBN 978-3-662-12944-9
- [99] ROTHHAUPT, A., Hg. *Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung*. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1995. München: Hanser, 1995. Fertigungstechnik - Erlangen. 44. ISBN 3-446-18307-8
- [100] GRAHAM, R.L., E.L. LAWLER, J.K. LENSTRA und A.H.G.R. KAN. Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey. In: P.L. HAMMER, E.L. JOHNSON und B.H. KORTE, Hg. *Discrete Optimization II. Symposium Proceedings*. Burlington: Elsevier, 1979, S. 287-326. ISBN 9780080867670
- [101] ISENBERG, F. *Ein dreistufiger integrierter Planungsansatz zur mehrstufigen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung in der spanenden Fertigung*. Dissertation. Paderborn, 06-2017
- [102] KARIMI, B., S.M.T. FATEMI GHOMI und J.M. WILSON. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms [online]. *Omega*, 2003, 31(5), S. 365-378. ISSN 03050483. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0305-0483(03)00059-8

- [103] BUSCHKÜHL, L., F. SAHLING, S. HELBER und H. TEMPELMEIER. Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches [online]. *OR Spektrum*, 2010, **32**(2), S. 231-261. ISSN 0171-6468.  
Verfügbar unter: doi:10.1007/s00291-008-0150-7
- [104] COPIL, K., M. WÖRBELAUER, H. MEYR und H. TEMPELMEIER. Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models [online]. *OR Spektrum*, 2017, **39**(1), S. 1-64. ISSN 0171-6468. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00291-015-0429-4
- [105] GÜNTHER, H.O. Planning lot sizes and capacity requirements in a single stage production system [online]. *European Journal of Operational Research*, 1987, **31**(2), S. 223-231. ISSN 0377-2217.  
Verfügbar unter: doi:10.1016/0377-2217(87)90026-9
- [106] FLEISCHMANN, B. The discrete lot-sizing and scheduling problem [online]. *European Journal of Operational Research*, 1990, **44**(3), S. 337-348. ISSN 0377-2217.  
Verfügbar unter: doi:10.1016/0377-2217(90)90245-7
- [107] FLEISCHMANN, B. The discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs [online]. *European Journal of Operational Research*, 1994, **75**(2), S. 395-404. ISSN 0377-2217. Verfügbar unter: doi:10.1016/0377-2217(94)90083-3
- [108] DREXL, A. und A. KIMMS. Lot sizing and scheduling—survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, 1997, **99**(2), S. 221-235
- [109] KARMARKAR, U.S., S. KEKRE und S. KEKRE. The dynamic lot-sizing problem with startup and reservation costs. *Operations Research*, 1987, **35**(3), S. 389-398
- [110] DREXL, A. und K. HAASE. Proportional lotsizing and scheduling [online]. *International Journal of Production Economics*, 1995, **40**(1), S. 73-87. ISSN 09255273.  
Verfügbar unter: doi:10.1016/0925-5273(95)00040-U

- [111] KIMMS, A. und A. DREXL. Proportional lot sizing and scheduling: Some extensions. *Networks*, 1998, **32**(2), S. 85-101
- [112] FLEISCHMANN, B. und H. MEYR. The general lotsizing and scheduling problem. *OR Spektrum*, 1997, **19**(1), S. 11-21
- [113] DOMSCHKE, W., A. SCHOLL und S. VOß. *Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte*. Berlin: Springer, 1993. Springer-Lehrbuch. ISBN 354056585X
- [114] ÖNCAN, T. A Survey of the Generalized Assignment Problem and Its Applications [online]. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 2007, **45**(3), S. 123-141. ISSN 0315-5986 [Zugriff am: 3. März 2019]. Verfügbar unter: doi:10.3138/infor.45.3.123
- [115] SCHOLL, A. und W. DOMSCHKE. *Logistik: Rundreisen und Touren* [online]. Verfügbar unter: [http://www.degruyter.com/search?f\\_o=isbnissn&q\\_o=9783486709971&searchTitles=true](http://www.degruyter.com/search?f_o=isbnissn&q_o=9783486709971&searchTitles=true)
- [116] KORTE, B. und J. VYGEN. *Kombinatorische Optimierung. Theorie und Algorithmen*. 2. Aufl. Berlin: Springer Spektrum, 2012. ISBN 9783642254017
- [117] LENSTRA, J.K., A.H.G. RINNOOY KAN und P. BRUCKER. Complexity of Machine Scheduling Problems. In: P.L. HAMMER, E.L. JOHNSON, B.H. KORTE und G.L. NEMHAUSER, Hg. *Studies in integer programming*. Amsterdam: North-Holland, 1977, S. 343-362. ISBN 9780720407655
- [118] RINNOOY KAN, A.H.G. Machine Scheduling Problems: Classification, complexity, and computations. *PhD thesis, University of Amsterdam*, 1976
- [119] WEGENER, I. *Komplexitätstheorie. Grenzen der Effizienz von Algorithmen*. Berlin: Springer, 2003. Springer-Lehrbuch. ISBN 9783540001614
- [120] ALMEDER, C. und R. TRAXLER. Das mehrstufige kapazitierte Losgrößenproblem. In: T. CLAUS, F. HERRMANN und M. MANITZ,

- Hg. *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 89-107. ISBN 978-3-662-43541-0
- [121] HUMMELTENBERG, W. und D.B. PREßMAR. Vergleich von Simulation und mathematischer Optimierung an Beispielen der Produktions- und Ablaufplanung [online]. *OR Spektrum*, 1989, **11**(4), S. 217-229. ISSN 0171-6468. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF01719918
- [122] KÜCK, M., T. BECKER und M. FREITAG. Emergence of Non-predictable Dynamics Caused by Shared Resources in Production Networks [online]. *Procedia CIRP*, 2016, **41**, S. 520-525. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.12.017
- [123] FU, M.C. Optimization for simulation: Theory vs. practice. *INFORMS Journal on Computing*, 2002, **14**(3), S. 192-215
- [124] JACOBSON, S. und L. SCHRUBEN. *A review of techniques for simulation optimization*, 1986
- [125] ANDRADOTTIR, S. A review of simulation optimization techniques. In: D.J. MEDEIROS, Hg. *1998 Winter Simulation Conference. Proceedings : Grand Hotel, Washington, D.C., 13-16 December, 1998*. Piscataway, N.J.: IEEE, 1998, S. 151-158. ISBN 0-7803-5133-9
- [126] SWISHER, J.R., P.D. HYDEN, S.H. JACOBSON und L.W. SCHRUBEN. A survey of simulation optimization techniques and procedures. In: J.A. JOINES, Hg. *2000 Winter simulation conference. proceedings: IEEE*, 2000, S. 119-128. ISBN 0-7803-6579-8
- [127] ALMEDER, C. und M. GANSTERER. Robuste operative Planung. In: T. CLAUS, F. HERRMANN und M. MANITZ, Hg. *Produktionsplanung und -steuerung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 47-60. ISBN 978-3-662-43541-0
- [128] JAN HELMIG, C.S. und S. KOMPA. Zeitdynamische Simulation in der Produktion. In: G. SCHUH und V. STICH, Hg. *Produktionsplanung und -steuerung 2. Evolution der PPS*. 4., überarbeitete Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2012, S. 195-231. ISBN 978-3-642-25426-0

- [129] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 3633 - Blatt 12: 2016-05, *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Simulation und Optimierung*. Berlin: Beuth Verlag
- [130] FU, M.C., F.W. GLOVER und J. APRIL. Simulation optimization: a review, new developments, and applications. In: *Proceedings of the 37th conference on Winter simulation, 2005*, S. 83-95
- [131] AMARAN, S., N.V. SAHINIDIS, B. SHARDA und S.J. BURY. Simulation optimization: a review of algorithms and applications [online]. *Annals of Operations Research*, 2016, **240**(1), S. 351-380. ISSN 0254-5330 [Zugriff am: 23. Juli 2018].  
Verfügbar unter: doi:10.1007/s10479-015-2019-x
- [132] LIN, J.T. und C.-M. CHEN. Simulation optimization approach for hybrid flow shop scheduling problem in semiconductor back-end manufacturing [online]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2015, **51**, S. 100-114. ISSN 1569190X.  
Verfügbar unter: doi:10.1016/j.simpat.2014.10.008
- [133] FELDMANN, K., Hg. *Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion. Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele*. Berlin: Springer, 2000. ISBN 3540658823
- [134] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 3633 - Blatt 1: 2014-12, *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag
- [135] KUHN, W. Digital Factory - Simulation Enhancing the Product and Production Engineering Process. In: *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*. s.l.: Winter Simulation Conference, 2006, S. 1899-1906. ISBN 1-4244-0501-7
- [136] MOURTZIS, D., N. PAPAKOSTAS, D. MAVRIKIOS, S. MAKRIS und K. ALEXOPOULOS. The role of simulation in digital manufacturing: applications and outlook [online]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2015, **28**(1), S. 3-24. ISSN 0951-192X. Verfügbar unter: doi:10.1080/0951192X.2013.800234

- [137] MOSTERMAN, P.J. An Overview of Hybrid Simulation Phenomena and Their Support by Simulation Packages. In: F.W. VAANDRAGER und J.H. VAN SCHUPPEN, Hg. *Hybrid Systems: Computation and Control*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999, S. 165-177. ISBN 978-3-540-48983-2
- [138] CLUNE, M.I., P.J. MOSTERMAN und C.G. CASSANDRAS. Discrete event and hybrid system simulation with simevents. In: *Proceedings of the 8th international workshop on discrete event systems*, 2006, S. 386-387
- [139] CREIGHTON, D.C. und S. NAHAVANDI. General Methodology 1: Optimising Discrete Event Simulation Models Using a Reinforcement Learning Agent. In: *Proceedings of the 34th Conference on Winter Simulation: Exploring New Frontiers: Winter Simulation Conference*, 2002, S. 1945-1950. ISBN 0-7803-7615-3
- [140] AYDIN, M.E. und E. ÖZTEMEL. Dynamic job-shop scheduling using reinforcement learning agents [online]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 33(2-3), S. 169-178. ISSN 09218890. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0921-8890(00)00087-7
- [141] OUELHADJ, D. und S. PETROVIC. A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems [online]. *Journal of Scheduling*, 2009, 12(4), S. 417-431. ISSN 1094-6136 [Zugriff am: 3. März 2019]. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10951-008-0090-8
- [142] CHENG, R., C. MACAL, B. NELSON, M. RABE, C. CURRIE, J. FOWLER und L.H. LEE. Simulation: the past 10 years and the next 10 years. In: T.M. ROEDER, P.I. FRAZIER, R. SZECHTMAN, E. ZHOU und FOWLER, Hg. *Simulating complex service systems. 2016 Winter Simulation Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 2180-2192
- [143] KRAHL, D. Extendsim advanced technology: Discrete rate simulation. In: M.D. ROSSETTI, Hg. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. (WSC 2009)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2009, S. 333-338. ISBN 978-1-4244-5770-0

- [144] LAW, A.M. *Simulation modeling and analysis*. 5. ed. Boston: McGraw-Hill Education, 2015. McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. ISBN 9780073401324
- [145] REGGELIN, T. *Mesoskopische Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme*. Magdeburg: docupoint, 2011. ISBN 978-3-940961-63-1
- [146] RABE, M., S. SPIECKERMANN und S. WENZEL. *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin: Springer, 2008. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-35281-5
- [147] KUDLICH, T. *Optimierung von Materialflusssystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation*. Dissertation. München, 2000
- [148] WUTTKE, C.C. *Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen in der Produktionslogistik*. Dissertation. Saarbrücken: LFT Univ, 2000. Schriftenreihe Produktionstechnik. 20. ISBN 3930429497
- [149] SELKE, C. *Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung*. München: Utz, 2005. Forschungsberichte IWB. Bd. 193. ISBN 3831604959
- [150] BERGMANN, S. und S. STRASSBURGER. Challenges for the automatic generation of simulation models for production systems. In: *Proceedings of the 2010 Summer Computer Simulation Conference*, 2010, S. 545-549
- [151] ROOKS, T. *Rechnergestützte Simulationsmodellgenerierung zur dynamischen Absicherung der Montagelogistikplanung bei der Fahrzeugneutypplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik*. Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2009. Aachen: Shaker, 2009. Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. 20. ISBN 9783832287450
- [152] BANKS, J. *Discrete-event system simulation*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001. Prentice-Hall international series in industrial and systems engineering. ISBN 0130887021

- [153] BALCI, O. Verification, validation, and testing. *Handbook of simulation*, 1998, **10**, S. 335-393
- [154] JEON, S.M. und G. KIM. A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC) [online]. *Production Planning & Control*, 2016, **27**(5), S. 360-377. ISSN 0953-7287. Verfügbar unter: doi:10.1080/09537287.2015.1128010
- [155] KJELSDOTTER, L. User experiences of Advanced Planning and Scheduling (APS) systems in production scheduling. *ISCAPS Project, Division of Logistics and Transportation, Department of Technology Management and Economics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden*, 2009
- [156] RANDELL, L. *On discrete-event simulation and integration in the manufacturing system development process*. Sweden: Lund University - Division of Robotics, P.O.Box 118, 221 00 Lund, 2002. ISBN 91-628-5319-8
- [157] WECK, M. *Simulation in CIM*. Berlin: Springer, 1991. CIM-Fachmann. ISBN 9783540532491
- [158] BESENFELDER, C., M. BRÜGGENOLTE, M. AUSTERJOST, N. KÄMMERLING, M. PÖTING, C. SCHWEDE und M. SCHELLERT. *Paradigmenwechsel der Planung und Steuerung von Wertschöpfungsnetzen*: Fraunhofer IML, 2017
- [159] RABE, M. und P. GOCEV. Simulation models for factory planning through connection of ERP and MES systems. In: S. WENZEL, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik*. Tagungsband zur 12. ASIM-Fachtagung. Erlangen: SCS Publ. House, 2006, S. 223-232. ISBN 3-936150-48-6
- [160] WENZEL, S., S. COLLISI-BÖHMER, H. PITSCH, O. ROSE und M. WEIß. *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. VDI-Buch. ISBN 9783540352723

- [161] KAPP, R. *Ein betriebsbegleitendes Fabriksimulationssystem zur durchgängigen Unterstützung der kontinuierlichen Fabrikadaption*. Heimsheim: Jost-Jetter, 2011. IPA-IAO Forschung und Praxis. 504. ISBN 978-3-939890-70-6
- [162] International Organization for Standardization. IEC 62264-1: 2013-05, *Enterprise-control system integration - Part 1: Models and terminology*. Genf: International Electrotechnical Commission
- [163] LOOS, P. Grunddatenverwaltung und Betriebsdatenerfassung als Basis der Produktionsplanung und-steuerung. *Produktionscontrolling*. Vahlen, München, 1999, S. 227-252
- [164] HOTZ, I. *Simulationsbasierte Frühwarnsysteme zur Unterstützung der operativen Produktionssteuerung und-planung in der Automobil-industrie*. Dissertation. Magdeburg, 2007
- [165] MÜLLER, E., J. ENGELMANN, T. LÖFFLER und J. STRAUCH. *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 9783540896432
- [166] THIEDE, S., G. BOGDANSKI und C. HERRMANN. A Systematic Method for Increasing the Energy and Resource Efficiency in Manufacturing Companies [online]. *Procedia CIRP*, 2012, 2, S. 28-33 [Zugriff am: 14. September 2018].  
Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2012.05.034
- [167] WOLFF, D., D. KULUS und S. DREHER. Simulating Energy Consumption in Automotive Industries. In: S. BANGSOW, Hg. *Use Cases of Discrete Event Simulation: Appliance and Research*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 59-86.  
ISBN 978-3-642-28777-0
- [168] SCHACHT, M. *Erweiterung des Planungsprozesses im Karosserie-  
rohbau um Energieaspekte zur Auslegung der Technischen Gebäude-  
ausrüstung*. Herzogenrath: Shaker, 2014. Berichte aus dem Institut  
für Konstruktions- und Fertigungstechnik. 36. ISBN 3844032711

- [169] SEEWALDT, M. und U. BRACHT. Energieorientierte Betrachtung von Engpässen in Fertigungssystemen mit der Materialflusssimulation. In: S. WENZEL und T. PETER, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik*. Tagungsband zur 17. ASIM-Fachtagung. Kassel: kassel university press GmbH, 2017, S. 29-38. ISBN 3737601925
- [170] PARYANTO. *Mechatronic simulation approach for the process planning of energy-efficient handling systems*. Dissertation
- [171] THIEDE, S., Y. SEOW, J. ANDERSSON und B. JOHANSSON. Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation—State of the art and research perspectives [online]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2013, 6(1), S. 78-87. ISSN 17555817. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cirpj.2012.10.004
- [172] HAAG, H. *Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. 11
- [173] BÖCKMANN, M.G. *Senkung der Produktionskosten durch Gestaltung eines Energiereglerkreis-Konzeptes*. s.l.: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2014. ISBN 3863592409
- [174] SCHLEGEL, A., J. STOLDT und M. PUTZ. Erweiterte Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation. In: W. DANGELMAIER, C. LAROQUE und A. KLAAS, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik. Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung*. Tagungsband zur 15. ASIM-Fachtagung. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst. Univ. Paderborn, 2013, S. 187-196. ISBN 9783942647359
- [175] ROEMER, A.C. und S. STEFFEN. A review of literature on simulation-based optimization of the energy efficiency in production. In: T.M. ROEDER, P.I. FRAZIER, R. SZECHTMAN, E. ZHOU und FOWLER, Hg. *Simulating complex service systems. 2016 Winter Simulation Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 1416-1427

- [176] PETER, T. und S. WENZEL. Simulationsgestützte Planung und Bewertung der Energieeffizienz für Produktionssysteme in der Automobilindustrie. In: M. RABE und U. CLAUSEN, Hg. *Simulation in production and logistics*. Tagungsband zur 16. ASIM Fachtagung. Stuttgart: Fraunhofer Verl., 2015, S. 535-544. ISBN 9783839609361
- [177] PETER, T., L. REICHE, S. WENZEL und M. FEHLBIER. Coupled Simulation of Energy and Material Flow - a Use Case in an Aluminium Foundry. In: W.K. CHAN, A. D'AMBROGIO, G. ZACHARAWICZ, N. MUSTAFEE, G. WAINER, E.H. PAGE und T. PETER, Hg. *2017 Winter Simulation Conference. WSC turns 50: simulation everywhere!* Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, 2017, S. 3792-3803
- [178] WENZEL, S., T. PETER, J. STOLDT, A. SCHLEGEL, T. UHLIG und J. JOSVAI. Considering Energy in the Simulation of Manufacturing Systems. In: *2018 Winter Simulation Conference (WSC). Proceedings*: IEEE, S. 3275-3286. ISBN 978-1-5386-6572-5
- [179] STAHL, B., M. TAISCH, A. CANNATA, F. MÜLLER, S. THIEDE, C. HERRMANN, A. CATALDO und F.C. ANTONIO. Combined Energy, Material and Building Simulation for Green Factory Planning. In: A.Y.C. NEE, B. SONG und S.-K. ONG, Hg. *Leveraging technology for a sustainable world. Proceedings of the 120th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*. Heidelberg: Springer, 2013, S. 493-498. ISBN 978-981-4451-47-5
- [180] JUNGE, M. *Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2007. Produktion & Energie. Bd. 1. ISBN 3899583019
- [181] WEINERT, N. *Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme*. Dissertation. Stuttgart: Fraunhofer-Verl., 2010. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin: Seliger, Günther (Hg.). ISBN 9783839601730
- [182] KOUKI, M., P. CASTAGNA, O. CARDIN und C. CORNARDEAU. An energy-related discrete event simulation approach. In: *11e congrès international de génie industriel (CIGI2015)*, 26. Oktober 2015

- [183] THIEDE, S. *Energy efficiency in manufacturing systems*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2011. Berlin: Springer, 2012. Sustainable production, life cycle engineering and management. ISBN 9783642259142
- [184] KHALAF, S. *Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Erstellung energieeffizienter Fertigungsstrategien für verkettete Fertigungssysteme*. Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2012. Aachen: Shaker, 2012. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum. 2012,11. ISBN 9783844014846
- [185] SCHMIDT, A. und T. PAWLETTA. Hybride Modellierung fertigungstechnischer Prozessketten mit Energieaspekten in einer ereignisdiskreten Simulationsumgebung. In: *ASIM 2014 - 22. Symposium Simulationstechnik*, 2014, S. 109-116
- [186] KOHL, J., S. SPRENG, B. HOFMANN und J. FRANKE. Minimization of energy needs in the industry of electric drives manufacturing considering process-related temperature curves. In: *2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*: IEEE, 30. September 2014 - 1. Oktober 2014, S. 1-6. ISBN 978-1-4799-5009-6
- [187] SCHLÜTER, W., M. HENNINGER, A. BUSWELL und J. SCHMIDT. Schwachstellenanalyse und Prozessverbesserung in Nichteisen-Schmelz- und Druckgussbetrieben durch bidirektionale Kopplung eines Materialflussmodells mit einem Energiemodell. In: S. WENZEL und T. PETER, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik*. Tagungsband zur 17. ASIM-Fachtagung. Kassel: kassel university press GmbH, 2017, S. 19-28. ISBN 3737601925
- [188] LAROQUE, C., A. SKOOGH und M. GOPALAKRISHNAN. Functional Interaction of Simulation and Data Analytics – Potentials and Existing Use-Cases. In: S. WENZEL und T. PETER, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik*. Tagungsband zur 17. ASIM-Fachtagung. Kassel: kassel university press GmbH, 2017, S. 403-412. ISBN 3737601925

- [189] RIPPEL, D., M. LÜTJEN, M.A. REDECKER, A. DECKER, M. FREITAG und K.-D. THOBEN. Simulating the Energy Consumption of Machines in Compound Feed Manufacturing for Investment Decisions. In: S. WENZEL und T. PETER, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik*. Tagungsband zur 17. ASIM-Fachtagung. Kassel: kassel university press GmbH, 2017, S. 79-88. ISBN 3737601925
- [190] KIBIRA, D., Q. HATIM, S. KUMARA und G. SHAO. Integration Data Analytics and Simulation Methods to Support Manufacturing Decision Making. In: L. YILMAZ, W.K.V. CHAN, I.-C. MOON, T. ROEDER, C. MACAL und M. ROSSETTI, Hg. *2015 Winter Simulation Conference*. Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE; Omnipress, 2015, S. 2100-2111. ISBN 9781467397438
- [191] AK, R. und R. BHINGE. Data Analytics and Uncertainty Quantification for Energy Prediction in Manufacturing. In: H. HO, Hg. *2015 IEEE International Conference on Big Data*. Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 2782-2784. ISBN 978-1-4799-9926-2
- [192] BAUMANN, F., H. WILSON, S. SEIDEL, M. FRANKE und U. GROMNITZA. OptPlanEnergie – Der Einsatz von Simulation und Optimierung zur Verringerung des Energiebedarfs bei der Produktion von Sicherheitsglas. In: S. WENZEL und T. PETER, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik*. Tagungsband zur 17. ASIM-Fachtagung. Kassel: kassel university press GmbH, 2017, S. 59-68. ISBN 3737601925
- [193] VOGEL-HEUSER, B., T. BAUERNHANSL und M. ten HOMPEL, Hg. *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4: Allgemeine Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Science and Business Media; Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-662-53253-9
- [194] REINHART, G., Hg. *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017. ISBN 978-3-446-44642-7
- [195] BOTTHOF, A. und E.A. HARTMANN. *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. Heidelberg: Springer, 2014. ISBN 3662459140

- [196] KAUFMANN, T. *Geschäftsmodelle in Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge. Der Weg von Anspruch in die Wirklichkeit*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN 978-3-658-10271-5
- [197] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 62264-1: 2014-07, *Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen - Teil 1: Modelle und Terminologie*. Berlin: Beuth Verlag
- [198] SIEPMANN, D. und N. GRAEF. Industrie 4.0 – Grundlagen und Gesamtzusammenhang. In: A. ROTH, Hg. *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*. Berlin Heidelberg: Springer Gabler, 2016, S. 17-82. ISBN 978-3-662-48504-0
- [199] VDI/VDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation*, April 2013. Thesen und Handlungsfelder
- [200] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 4499 Blatt 1: 2008-02, *Digitale Fabrik - Grundlagen*. Berlin: Beuth
- [201] SCHLICK, J., P. STEPHAN, M. LOSKYLL und D. LAPPE. Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: T. BAUERNHANSL, M. ten HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, Hg. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 57-84. ISBN 978-3-658-04681-1
- [202] LEE, E.A. Cyber physical systems: Design challenges. In: IEEE COMPUTER SOCIETY, Hg. *ISORC '08: Proceedings of the 2008 11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing*: IEEE, 2008, S. 363-369. ISBN 978-0-7695-3132-8
- [203] GILL, H. *NSF Perspective and Status on Cyber-physical Systems: National Workshop on Cyber-physical Systems*. Austin, TX, 16. Oktober 2006
- [204] BAUERNHANSL, T. Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: B. VOGEL-HEU-

- SER, T. BAUERNHANSL und M. ten HOMPEL, Hg. *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4: Allgemeine Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Science and Business Media; Springer Vieweg, 2016, S. 1-31. ISBN 978-3-662-53253-9
- [205] LUCKE, D., C. CONSTANTINESCU und E. WESTKÄMPER. Smart Factory - A Step towards the Next Generation of Manufacturing. In: M. MITSUISHI, K. UEDA und F. KIMURA, Hg. *Manufacturing systems and technologies for the new frontier. The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, May 26-28, 2008, Tokyo, Japan*. London: Springer, 2008, S. 115-118. ISBN 978-1-84800-266-1
- [206] LUCKE, D. Smart Factory. In: E. WESTKÄMPER, Hg. *Digitale Produktion*. Berlin: Springer Vieweg, 2013, S. 251-269. ISBN 978-3-642-20258-2
- [207] PETHIG, F., S. SCHRIEGEL, A. MAIER, J. OTTO, S. WINDMANN, B. BÖTTCHER, O. NIGGEMANN und J. JASPERNEITE. *Industrie 4.0 Kommunikation mit OPC UA. Leitfaden zur Einführung in den Mittelstand*. Frankfurt, Germany: VDMA Guideline, Publisher: VDMA Verlag GmbH, Editor: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., 2017. ISBN: 9783816307099
- [208] BOSCHERT, S. und R. ROSEN. Digital Twin—The Simulation Aspect. In: P. HEHENBERGER und D. BRADLEY, Hg. *Mechatronic futures. Challenges and solutions for mechatronic systems and their designers*. Switzerland: Springer, 2016, S. 59-74. ISBN 978-3-319-32154-7
- [209] BRACHT, U., D. GECKLER und S. WENZEL. *Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018. VDI-Buch. ISBN 9783662557822
- [210] REINHART, G., J. MILBERG und C. FELDMANN. *Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. 104. ISBN 9783540620594

- [211] SCHUH, G., M. BLUM, J. RESCHKE und M. BIRKMEIER. Der Digitale Schatten in der Auftragsabwicklung [online]. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2016, **111**(1-2), S. 48-51. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.111458
- [212] SCHUH, G., P. NYHUIS, C. REUTER, A. HAUPTVOGEL, S. SCHMITZ, J. NYWLT, F. BRAMBRING, F. SCHULTE und J. HANSEN. Produktionsdaten als Enabler für Industrie 4.0 : Gemeinsame Studie der produktionstechnischen Institute IFA, IPMT, Fraunhofer IWU und WZL [online]. *wt Werkstattstechnik online*, 2015, **105**(4), S. 200-203. Verfügbar unter: <https://publications.rwth-aachen.de/record/573610>
- [213] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 5600 Blatt 3: 2013-06, *Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems - MES)*. Berlin: Beuth
- [214] STEINWASSER, P. *Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt-und Prozessplanung*. Bamberg: Meisenbach GmbH Verlag, 1997. Fertigungstechnik - Erlangen. 63. ISBN 3875250842
- [215] FELDMANN, K., T. SCHMUCK, M. BROSSOG und J. DREYER. Beschreibungsmodell zur Planung von Produktionssystemen. Entwicklung eines Beschreibungsmodells für Produkte, Prozesse und Ressourcen zur rechnergestützten Planung produktionstechnischer Systeme. *wt Werkstattstechnik*, 2008, **98**(3)
- [216] Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau. VDI 66412-3: 2014-04, *Manufacturing Execution Systems (MES) – Ablaufbeschreibungen zur Datenerfassung*. Berlin: Beuth
- [217] Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau. VDI 66412-1: 2009-10, *Manufacturing Execution Systems (MES) – Kennzahlen*. Berlin: Beuth
- [218] PROBST, G.J.B. und K. ROMHARDT. Bausteine des Wissensmanagements — ein praxisorientierter Ansatz. In: *Handbuch Lernende*

- Organisation*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1997, S. 129-143.  
ISBN 978-3-322-89843-2
- [219] PIATETSKY-SHAPIRO, G. und W.J. FRAWLEY, Hg. *Knowledge discovery in databases*. Menlo Park, Calif.: AAAI Press, 1991.  
ISBN 0262660709
- [220] FAYYAD, U., G. PIATETSKY-SHAPIRO und P. SMYTH. From data mining to knowledge discovery in databases. *AI magazine*, 1996, **17**(3), S. 37
- [221] HEHENBERGER, P. *Computerunterstützte Fertigung. Eine kompakte Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 9783642134746
- [222] BACHER, J., A. PÖGE und K. WENZIG. *Clusteranalyse. Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren*. 3., erg., vollst. überarb. u. neu gestalt. Aufl. München: Oldenbourg, 2011. ISBN 978-3-486-58457-8
- [223] WITTEN, I.H., C.J. PAL, E. FRANK und M.A. HALL. *Data mining. Practical machine learning tools and techniques*. Fourth edition. Cambridge, MA: Morgan Kaufmann, 2017. ISBN 9780128042915
- [224] FAYYAD, U.M., G. PIATETSKY-SHAPIRO und P. SMYTH. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases [online]. *AI magazine*, **1996**(Nr. 3), S. 37-54. Verfügbar unter: <http://www.kdnuggets.com/gpspubs/aimag-kdd-overview-1996-Fayyad.pdf>
- [225] RUNKLER, T.A. *Data Mining. Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010. Computational intelligence. ISBN 978-3-8348-0858-5
- [226] HILLAR, G.C. *MQTT essentials. A lightweight IoT protocol : the preferred IoT publish-subscribe lightweight messaging protocol*. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2017. ISBN 9781787287815
- [227] EDSTROM, D. *MTConnect: to measure is to know. How and why a royalty-free and open-source standard is revolutionizing the business*

- and technology of manufacturing*. Ashburn, VA: Virtual Photons Electrons LLC, 2013. ISBN 9780989074209
- [228] PARDO-CASTELLOTE, G. OMG data-distribution service: architectural overview. In: *23rd International Conference on Distributed Computing Systems workshops. 19-22 May 2003, Providence, Rhode Island, USA : proceedings*. Los Alamitos, Calif.: IEEE Computer Society, 2003, S. 200-206. ISBN 0-7695-1921-0
- [229] ETSCHBERGER, K., R. HOFMANN, A. LORINSER, C. SCHLEGEL, J. STOHLBERG und T.A.H.M. SUTERS. *Controller-Area-Network. Grundlagen, Protokolle, Bausteine, Anwendungen*. 2. Aufl. München: Hanser, 2000. ISBN 3-446-19431-2
- [230] SHELBY, Z., K. HARTKE und C. BORMANN. *The constrained application protocol (CoAP)* [online]. RFC 7252. 2014 [Zugriff am: 8. Oktober 2018].  
Verfügbar unter: <http://www.rfc-editor.org/info/rfc7252>
- [231] BORMANN, C., A.P. CASTELLANI und Z. SHELBY. CoAP: An Application Protocol for Billions of Tiny Internet Nodes [online]. *IEEE Internet Computing*, 2012, **16**(2), S. 62-67. ISSN 1089-7801. Verfügbar unter: doi:10.1109/MIC.2012.29
- [232] WELLENREUTHER, G. und D. ZASTROW. *Automatisieren mit SPS - Theorie und Praxis. Programmierung: DIN EN 61 131-3, STEP 7, CoDeSys, Entwurfsverfahren, Bausteinbibliotheken Applikationen: Steuerungen, Regelungen, Antriebe, Safety Kommunikation: AS-i-Bus, PROFIBUS, Ethernet-TCP/IP, PROFINET, Web-Technologien, OPC*. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008. ISBN 9783528239107
- [233] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN SPEC 91345: 2016-04, *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*. Berlin: Beuth Verlag
- [234] KROLL, J. *Normung für Industrie 4.0* [online]. *Auf dem Weg zur Smart Factory*. IEC Meeting, 2014. 8 Oktober 2018, 12:00. Verfügbar

- unter: <https://www.computer-automation.de/feldebene/vernetzung/artikel/108790/1/>
- [235] LANGE, J., F. IWANITZ und T.J. BURKE. *OPC. Von Data Access bis Unified Architecture*. 5. Auflage. Berlin: VDE Verlag GmbH, 2016. ISBN 978-3-8007-3506-8
- [236] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN CLC/TR 62541-1: 2011-07, *OPC Unified Architecture - Teil 1: Übersicht und Konzepte*. Berlin: Beuth Verlag
- [237] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 62541-5: 2015-11, *OPC Unified Architecture - Teil 5: Informationsmodell*. Berlin: Beuth Verlag
- [238] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 62541-3: 2015-11, *OPC Unified Architecture - Teil 3: Adressraummodell*. Berlin: Beuth Verlag
- [239] SCHENK, M. *Instandhaltung technischer Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-03948-5
- [240] MAHNKE, W., S.H. LEITNER und M. DAMM. *OPC Unified Architecture*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009. ISBN 978-3-540-68898-3
- [241] FAY, A., X.L. HOANG, C. DIEDRICH, M. DUBOVY, C. ECK, C. HILDEBRANDT, A. SCHOLZ, T. SCHRÖDER und R. WIEGAND. *Abschlussbericht - SemAnz40. Vorhandene Standards als semantische Basis für die Anwendung von Industrie 4.0*. Projektabschlussbericht. Hamburg, 2018
- [242] SCHLEIPEN, M. *Adaptivität und semantische Interoperabilität von Manufacturing Execution Systemen*. Print on demand. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2013. Karlsruher Schriften zur Anthropomatik. 12. ISBN 978-3-86644-955-8
- [243] NIEHUES, M., G. REINHART, R.H. SCHMITT, G. SCHUH, F. BRAMBRING, M. ELLERICH, H. ELSER, D. FRANK, S. GROGGERT, A. GÜTZLAFF, V. HEINRICHS, T. HEMPEL, K. KOSTYSZYN, H.

- NGO, L. NIENDORF, E. PERMIN, J.-P. PROTE, C. REUTER und R. TÜRTMANN. Organisation, Qualität und IT-Systeme für Planung und Betrieb. In: G. REINHART, Hg. *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017, S. 137-167. ISBN 978-3-446-44642-7
- [244] PLACH, A. *Entwicklung einer expertenbasierten Fehlermanagement-Methode*. Aachen: Shaker, 2011
- [245] MÜHLNICKEL, H., C.M. KURZ, P. JUSSEN und R. EMONTS-HOLLEY. Smart Maintenance. In: J. REICHEL, G. MÜLLER und J. HAEFFS, Hg. *Betriebliche Instandhaltung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 349-360. ISBN 9783662531341
- [246] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 31051: 2012-09, *Grundlagen der Instandhaltung*. Berlin: Beuth Verlag
- [247] WERNER, R. *Instandhaltung*. 2. Aufl. Berlin: VDE Verlag GmbH, 2008. Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze. 12. ISBN 978-3-8022-0919-2
- [248] MOUBRAY, J. und W. KUGLER. *RCM - die hohe Schule der Zuverlässigkeit von Produkten und Systemen*. Landsberg: Verlag Moderne Industrie, 1996. ISBN 3-478-91630-5
- [249] MATYAS, K. Ganzheitliche Optimierung durch individuelle Instandhaltungsstrategien. *Industrie Management*, 2002(18), S. 13-16
- [250] KRIMMLING, J. *Facility Management. Strukturen und methodische Instrumente*. 2., aktualisierte Aufl. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 2008. ISBN 978-3-8167-7498-3
- [251] MATYAS, K. *Taschenbuch Instandhaltungslogistik. Qualität und Produktivität steigern*. 3., vollst. überarb. Aufl. München: Hanser, 2008. Praxisreihe Qualitätswissen. ISBN 3446411925
- [252] STURM, A. und R. FÖRSTER. *Maschinen- und Anlagendiagnostik für die zustandsbezogene Instandhaltung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1990. ISBN 9783519063339

- [253] KOLERUS, J. und J. WASSERMANN. *Zustandsüberwachung von Maschinen. Das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker ; mit 7 Tabellen und DVD-ROM*. 6., aktualisierte Aufl. Renningen: Expert-Verl., 2014. Edition expertsoft. 79. ISBN 978-3-8169-3236-9
- [254] BENDER, A., T. KAUL und W. SEXTRO. Entwicklung eines Condition Monitoring Systems für Gummi-Metall-Elemente. In: E. BODDEN, F. DRESSLER, R. DUMITRESCU, J. GAUSEMEIER, F. MEYER AUF DER HEIDE, C. SCHEYTT und A. TRÄCHTLER, Hg. *Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme (WInTeSys)*. Paderborn, 2017, S. 347-358. ISBN 9783942647885
- [255] ENGEL, P. *Entwicklung neuer Diagnoseverfahren auf der Basis multivariater Methoden und deren Anwendung in einem Condition Monitoring System*. Dissertation. Duisburg-Essen, 2012
- [256] DING, S.X. *Model-Based Fault Diagnosis Techniques. Design Schemes, Algorithms and Tools*. 2. Auflage. London: Springer, 2013. Advances in Industrial Control. ISBN 9781447147985
- [257] JARDINE, A.K.S., D. LIN und D. BANJEVIC. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance [online]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, **20**(7), S. 1483-1510. ISSN 08883270.  
Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ymsp.2005.09.012
- [258] RÖSCH, M. *Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion*. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2011. Bamberg: Meisenbach, 2011. Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. 221. ISBN 9783875253191
- [259] MUHR, M. Technische Diagnostik. Strategie für eine moderne Instandhaltung. *e&i Elektrotechnik und Informationstechnik*, **1998** (Volume 115, Issue 10), S. 519-523

- [260] GREBNER, J. *Entwicklung eines wissensbasierten Systems zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung der Minimalmengenschmierung bei der Planung flexibler Fertigungssysteme*. Dissertation. Darmstadt, 2017
- [261] BRECHER, C., W. HERFS, D. ÖZDEMIR, M. OBDENBUSCH, J. NITTINGER, F. WELLMANN, M. KÖNIGS, C. KRELLA und S. SITTIG. Die vernetzte Werkzeugmaschine. In: G. REINHART, Hg. *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017, S. 341-378. ISBN 978-3-446-44642-7
- [262] STADTLER, H. Production Planning and Scheduling. In: H. STADTLER und C. KILGER, Hg. *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 199-216. ISBN 978-3-540-74511-2
- [263] HEINICKE, M. *Resilienzorientierte Beurteilung von Produktionsstrukturen*. Dissertation. Magdeburg, 14. Dezember 2017
- [264] GRUBER, M., M. RINNER, T. LÖSCHER, C. ALMEDER, R. HARTL und S. KATZENSTEINER. Vorausschauende Produktionsregelung durch simulationsbasierte heuristische Optimierung. In: L. MÄRZ, W. KRUG, O. ROSE und G. WEIGERT, Hg. *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 65-77. ISBN 9783642145353
- [265] GANSTERER, M., C. ALMEDER und R.F. HARTL. Simulation-based optimization methods for setting production planning parameters [online]. *International Journal of Production Economics*, 2014, **151**, S. 206-213. ISSN 09255273. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijpe.2013.10.016
- [266] ALMEDER, C., M. PREUSSER und R.F. HARTL. Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches? [online]. *OR Spektrum*, 2009, **31**(1), S. 95-119. ISSN 0171-6468. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00291-007-0118-z

- [267] ALMEDER, C. und M. PREUSSER. A hybrid simulation optimization approach for supply chains. In: B. ZUPANČIČ, R. KARBA und S. BLAŽIČ, Hg. *EUROSIM 2007. Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, 9-13 September 2007, Ljubljana, Slovenia*. Vienna: ARGESIM, op. 2007. ISBN 978-3-901608-32-2
- [268] KRUG, W. und M. SCHWOPE. Simulationsbasierte Reihenfolgeoptimierung in der Produktionsplanung und -steuerung. In: L. MÄRZ, W. KRUG, O. ROSE und G. WEIGERT, Hg. *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 105-116. ISBN 9783642145353
- [269] WEIß, M., J. HENNIG und W. KRUG. Simulative Optimierung von Verpackungsanlagen. In: L. MÄRZ, W. KRUG, O. ROSE und G. WEIGERT, Hg. *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 185-193. ISBN 9783642145353
- [270] FRANTZÉN, M. *A real-time simulation-based optimisation environment for industrial scheduling*. Dissertation. Leicester, 04-2013
- [271] FRAZZON, E.M., M. KÜCK und M. FREITAG. Data-driven production control for complex and dynamic manufacturing systems. *CIRP Annals*, 2018
- [272] KÜCK, M., E. BRODA, M. FREITAG, T. HILDEBRAND und E.M. FRAZZON. Towards adaptive simulation-based optimization to select individual dispatching rules for production control. In: W.K. CHAN, A. D'AMBROGIO, G. ZACHAREWICZ, N. MUSTAFEE, G. WAINER, E.H. PAGE und T. PETER, Hg. *2017 Winter Simulation Conference. WSC turns 50: simulation everywhere!* Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, 2017, S. 3852-3863
- [273] KÜCK, M., J. EHM, M. FREITAG, E.M. FRAZZON und R. PIMENTEL. A Data-Driven Simulation-Based Optimisation Approach for

- Adaptive Scheduling and Control of Dynamic Manufacturing Systems [online]. *Advanced Materials Research*, 2016, **1140**, S. 449-456. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1140.449
- [274] KÜCK, M., J. EHM, T. HILDEBRANDT, M. FREITAG und E.M. FRAZZON. Potential of data-driven simulation-based optimization for adaptive scheduling and control of dynamic manufacturing systems. In: T.M. ROEDER, P.I. FRAZIER, R. SZECHTMAN, E. ZHOU und FOWLER, Hg. *Simulating complex service systems. 2016 Winter Simulation Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 2820-2831
- [275] KLEMMT, A., S. HORN und G. WEIGERT. Simulationsgestützte Optimierung von Fertigungsprozessen in der Halbleiterindustrie. In: L. MÄRZ, W. KRUG, O. ROSE und G. WEIGERT, Hg. *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 49-63. ISBN 9783642145353
- [276] HORN, S. *Simulationsgestützte Optimierung von Fertigungsabläufen in der Produktion elektronischer Halbleiterspeicher*. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2008. Templin: Detert, 2008. System integration in electronic packaging. 5. ISBN 9783934142305
- [277] KLEMMT, A. *Ablaufplanung in der Halbleiter- und Elektronikproduktion*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. ISBN 978-3-8348-1993-2
- [278] MONOSTORI, L., B. KÁDÁR, A. PFEIFFER und D. KARNOK. Solution Approaches to Real-time Control of Customized Mass Production [online]. *CIRP Annals*, 2007, **56**(1), S. 431-434. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cirp.2007.05.103
- [279] PFEIFFER, A., B. KADAR, G. POPOVICS, C. KARDOS, Z. VEN, L. KEMENY und L. MONOSTORI. Applying model-reconstruction by exploring MES and PLC data for simulation support of production systems. In: C. LAROQUE, J. HIMMELSPACH, R. PASUPATHY, O. ROSE und A.M. UHRMACHER, Hg. *Proceedings of the 2012 Winter*

- Simulation Conference (WSC): IEEE*, 9. Dezember 2012 - 12. Dezember 2012, S. 1-13. ISBN 978-1-4673-4782-2
- [280] KARDOS, C., G. POPOVICS, B. KÁDÁR und L. MONOSTORI. Methodology and Data-structure for a Uniform System's Specification in Simulation Projects [online]. *Procedia CIRP*, 2013, 7, S. 455-460. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2013.06.015
- [281] MONOSTORI, L., B. KÁDÁR, T. BAUERNHANSL, S. KONDOH, S. KUMARA, G. REINHART, O. SAUER, G. SCHUH, W. SIHN und K. UEDA. Cyber-physical systems in manufacturing [online]. *CIRP Annals*, 2016, 65(2), S. 621-641. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cirp.2016.06.005
- [282] PFEIFFER, A., D. GYULAI, B. KÁDÁR und L. MONOSTORI. Manufacturing Lead Time Estimation with the Combination of Simulation and Statistical Learning Methods [online]. *Procedia CIRP*, 2016, 41, S. 75-80. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.12.018
- [283] BOURIER, G. *Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik. Praxisorientierte Einführung Mit Aufgaben und Lösungen*. 8., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013. ISBN 9783658014469
- [284] SIEBERTZ, K., D. VAN BEBBER und T. HOCHKIRCHEN. *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE)*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. VDI-Buch. ISBN 3662557436
- [285] WAGNER, W., A. KRUSE und H.-J. KRETZSCHMAR. *Properties of water and steam. The industrial standard IAPWS-IF97 for the thermodynamic properties and supplementary equations for other properties ; tables based on these equations*. Berlin: Springer, 1998. ISBN 3540643397
- [286] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 4108-3: 2018-10, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz*. Berlin: Beuth Verlag

- [287] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 1097-5: 2008-06, *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 5: Bestimmung des Wassergehalts durch Ofentrocknung*. Berlin: Beuth Verlag
- [288] UPASANI, A. und R. UZSOY. Integrating a decomposition procedure with problem reduction for factory scheduling with disruptions [online]. A simulation study. *International Journal of Production Research*, 2008, **46**(21), S. 5883-5905. ISSN 0020-7543. Verfügbar unter: doi:10.1080/00207540601156215
- [289] CHAMBERS, R.J., R.L. CARRAWAY, T.J. LOWE und T.L. MORIN. Dominance and Decomposition Heuristics for Single Machine Scheduling [online]. *Operations Research*, 1991, **39**(4), S. 639-647. ISSN 0030-364X. Verfügbar unter: doi:10.1287/opre.39.4.639
- [290] ZHAI, Y., C. LIU, W. CHU, R. GUO und C. LIU. A decomposition heuristics based on multi-bottleneck machines for large-scale job shop scheduling problems [online]. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2014, **7**(5). ISSN 2013-0953. Verfügbar unter: doi:10.3926/jiem.1206
- [291] MEYR, H. *Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung für kontinuierliche Produktionslinien. Modelle und Methoden im Rahmen des Supply Chain Management*. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1999. Produktion und Logistik. ISBN 9783824469994
- [292] ZEIDI, J.R. und S. MOHAMMADHOSSEINI. Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times [online]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, **81**(9-12), S. 1487-1496. ISSN 0268-3768. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00170-015-7215-y
- [293] CHURCH, L.K. und R. UZSOY. Analysis of periodic and event-driven rescheduling policies in dynamic shops. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1992, **5**(3), S. 153-163

- [294] AYTUG, H., M.A. LAWLEY, K. MCKAY, S. MOHAN und R. UZSOY. Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions. *European Journal of Operational Research*, 2005, **161**(1), S. 86-110
- [295] NEUHAUS, U. *Reaktive Planung in der chemischen Industrie. Verfahren zur operativen Plananpassung für Mehrzweckanlagen*. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008. Gabler Edition Wissenschaft. ISBN 9783834910684

**Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen**

- [P1] DONHAUSER, T., T. RACKOW, J. HIRSCHBRUNN, P. SCHUDERER und J. FRANKE. Valid methodology for using discrete event simulation to improve the resource consumption for the manufacturing of masonry units. *Procedia CIRP*, 2016, **41**, S. 57-62
- [P2] DONHAUSER, T., J. EHRHARDT, T. RACKOW, J. FRANKE und P. SCHUDERER. Simulation-Based Optimization of the Energy Consumption in the Hardening Process for Calcium Silicate Masonry Units [online]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, **805**, S. 249-256. ISSN 1662-7482. Verfügbar unter:  
doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.805.249
- [P3] DONHAUSER, T., J. LOHSE, J. FRANKE und P. SCHUDERER. Efficient Method for Optimizing Calcium Silicate Masonry Unit Manufacturing Using Simulation-Based Optimization and Decomposition [online]. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, **856**, S. 99-108. ISSN 1662-7482. Verfügbar unter:  
doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.856.99
- [P4] DONHAUSER, T., W. EDEN, J. FRANKE, T. JUNG und P. SCHUDERER. *Entwicklung einer Methodik zur ressourcenorientierten Steuerung der Werksprozesse in der Kalksandstein-Industrie. Forschungsbericht Nr. 119*. Hannover, 2015
- [P5] DONHAUSER, T., L. BAIER, T. EBERSBACH, P. SCHUDERER und J. FRANKE. Simulationsbasierte Optimierung von Fabrikabläufen. Implementierung und Test eines Algorithmus zur ereignisbasierten Regelung der Materialflüsse. *wt-online*, 2018, (4)
- [P6] DONHAUSER, T., T. EBERSBACH, J. FRANKE und P. SCHUDERER. Rolling-reactive Optimization of Production Processes in a Calcium Silicate Masonry Unit Plant Using Online Simulation [online]. *Procedia CIRP*, 2018, **72**, S. 249-254. Verfügbar unter:  
doi:10.1016/j.procir.2018.03.266

- [P7] RACKOW, T., T. DONHAUSER, J. HÜBLER, P. SCHUDERER und J. FRANKE. Planung von Energieverbräuchen in der Produktion. Vorschlag und Diskussion von Methoden zur Unterstützung des Energiemanagements. *wt - Werkstattstechnik online*, 2015, **105**(5), S. 329-333
- [P8] RACKOW, T., T. DONHAUSER, P. SCHUDERER und J. FRANKE. Integrated Energy-Controlling in Industrial Value Chains. In: J. FRANKE und S. KREITLLEIN, Hg. *Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production*. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd, 2015, S. 86-93
- [P9] RACKOW, T., T. JAVIED, T. DONHAUSER, C. MARTIN, P. SCHUDERER und J. FRANKE. Green Cockpit: Transparency on Energy Consumption in Manufacturing Companies [online]. *Procedia CIRP*, 2015, **26**, S. 498-503. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.01.011
- [P10] MAYR, A., T. LECHLER, T. DONHAUSER, M. METZNER, E. SCHÄFFER, E. FISCHER und J. FRANKE. Advances in energy-related plant simulation by considering load and temperature profiles in discrete event simulation [online]. *Procedia CIRP*, 2019, **81**, S. 1325-1330. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2019.04.021
- [P11] DONHAUSER, T., A. MAYR, L. BAIER und J. FRANKE. Verfolgung von Bauteil- und Anlagentemperaturen in Produktionssystemen zur Energiesimulation bei thermischen Einflussfaktoren. In: M. PUTZ und A. SCHLEGEL, Hg. *ASIM 2019. Simulation in Produktion und Logistik*. Auerbach /Vogtl.: Wissenschaftliche Scripten, 2019, S. 163-172. ISBN 978-3-95735-113-5
- [P12] BAIER, L., T. DONHAUSER, P. SCHUDERER und J. FRANKE. Heuristical Solution for Scheduling Single Stage Parallel Machines Production of Calcium Silicate Masonry Units with Sequence-Dependent Changeover Times to Improve Energy Efficiency. In: *Applied Mechanics and Materials*: Trans Tech Publications, 2017, S. 208-219. ISBN 978-3-0357-1215-5

- [P13] SCHOLZ, M., S. OBERSCHACHTSIEK, T. DONHAUSER und J. FRANKE. Software-in-the-loop testbed for multi-agent-systems in a discrete event simulation. Integration of the Java Agent Development Framework into Plant Simulation. In: *2017 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, S. 1-6
- [P14] SCHOLZ, M., T. DONHAUSER und J. FRANKE. Integration eines Multi-Agenten-Systems in eine Ereignisdiskrete Materialflusssimulation. In: T. LOOSE, Hg. *Tagungsband Workshop 2018 ASIM/GI-Fachgruppen. Hochschule Heilbronn, 8. und 9. März 2018*. Wien: ARGESIM Verlag, 2018, 27-32. ISBN 978-3-901608-19-3
- [P15] DONHAUSER, T., D. KISSKALT, A. MAYR, M. SCHOLZ, P. SCHUDERER und J. FRANKE. Integration maschineller Lernverfahren in eine Materialflusssimulation zur Verhaltensabstraktion und -vorhersage komplexer Fertigungssysteme. In: M. PUTZ und A. SCHLEGEL, Hg. *ASIM 2019. Simulation in Produktion und Logistik*. Auerbach /Vogtl.: Wissenschaftliche Scripten, 2019, S. 19-28. ISBN 978-3-95735-113-5

## Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten\*

- [S1] BAIER, L., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Bestimmung der sortenspezifisch optimalen Losgrößen bei der Herstellung von Kalksandsteinen*. Masterarbeit. Erlangen, 15. Januar 2016
- [S2] BAIER, L., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Entwicklung einer intuitiven Benutzeroberfläche zur Eingabe der Optimierungsparameter in das "KS-Cockpit*. Projektarbeit. Erlangen, 10. Mai 2015
- [S3] BONDAR, T., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Grad der Etablierung von Energieverbräuchen als Zielgröße in der Produktionsplanung und -steuerung*. Projektarbeit. Erlangen, 30. September 2015
- [S4] EBERSBACH, T., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Konzepterarbeitung und Validierung eines Tools zur rollierenden Optimierung der Produktionsabläufe in einem Kalksandsteinwerk*. Masterarbeit. Erlangen, 29. September 2017
- [S5] EBERSBACH, T., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Test und Validierung eines Algorithmus zur simulationsgestützten Optimierung der Fertigungsabläufe in einem Kalksandsteinwerk*. Projektarbeit. Erlangen, 2. Mai 2017
- [S6] ENDTER, U., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Erstellung eines Konzepts zur Erfassung und Bereitstellung von Betriebsdaten zur betriebsbegleitenden Simulation einer Fertigung*. Masterarbeit. Erlangen, 2. Februar 2018

---

\* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

- [S7] ERCAN, S., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Einsatz von Condition Monitoring Systemen zur Überwachung und Analyse von Anlagen und Ressourcenverbräuchen*. Projektarbeit. Erlangen, 19. April 2016
- [S8] FLICKER, M., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Marktanalyse: Nutzung der Ablaufsimulation zur Produktionsplanung und -steuerung in kleinen und mittelständischen Unternehmen*. Projektarbeit. Erlangen, 15. April 2016
- [S9] HIRSCHBRUNN, J., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Simulative Abbildung der Produktionsprozesse des Kalksandsteinwerks Wallenhorst zur ressourcenorientierten Optimierung der Fertigungsabläufe*. Projektarbeit. Erlangen, 3. Oktober 2014
- [S10] HORNING, S., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Eignung von Advanced Planning and Scheduling Systemen für den Einsatz in Kalksandsteinwerken*. Projektarbeit. Erlangen, 6. Oktober 2014
- [S11] HUBBERT, J., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Ermittlung und Aufnahme relevanter Daten zur Erstellung einer Energie-simulation für Verbraucher thermischer Energie in Kalksandsteinwerken*. Bachelorarbeit. Erlangen, 15. September 2016
- [S12] KNODEL, F., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Nutzen- und Anforderungsanalyse für eine Materialflusssimulation in einem Kalksandsteinwerk*. Projektarbeit. Erlangen, 28. Mai 2017
- [S13] KOHL, M., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Modulare Inbetriebsetzung des Demonstrators „Assembl-I4.0“ zur Verknüpfung mit der Simulationssoftware Plant Simulation*. Masterarbeit. Erlangen, 30. März 2017

- [S14] KOHL, M., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Möglichkeiten der Anbindung von SPS an die Leitebene eines Unternehmens zur echtzeitbasierten Materialflusssimulation*. Projektarbeit. Erlangen, 26. Mai 2016
- [S15] KÜLECKI, H., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Stand der Technik im Bereich der Absatzplanung zur Übertragung einer geeigneten Methodik auf Kalksandsteinwerke*. Projektarbeit. Erlangen, 18. April 2016
- [S16] LACHNER, A., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Integration des Energieverbrauchs thermisch betriebener Anlagen in eine Materialflusssimulation auf Grundlage von kontinuierlich erfassten Messdaten*. Masterarbeit. Erlangen, 30. September 2016
- [S17] LOHSE, J., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Integration of Optimization Algorithms in a Calcium Silicate Masonry Manufacturing Simulation Model*. Masterarbeit. Erlangen, 14. Juni 2016
- [S18] NEUMANN, T., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Entwicklung eines selbstlernenden Systems zur Integration von kontinuierlich gemessenen Energieverbräuchen elektrischer Anlagen in ein Simulationsmodell*. Masterarbeit. Erlangen, 30. Oktober 2016
- [S19] NIEMANN, J., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Prototypische Analyse der Eignung von APS-Systemen zur Optimierung der Fertigungsprozesse in einem Kalksandsteinwerk*. Projektarbeit. Erlangen, 14. April 2014
- [S20] OBERSCHACHTSIEK, S., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Erstellung eines Modul-Baukastens in Plant Simulation für die Simulation der Lagerprozesse in einem beliebigen Kalksandsteinwerk*. Projektarbeit. Erlangen, 12. August 2016

- [S21] OBUCINA, M., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Integration des Fertigwarenlagers im Kalksandsteinwerk Dresden in eine Ablaufsimulation*. Bachelorarbeit. Erlangen, 13. September 2014
- [S22] POLZMACHER, C., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Konzepterstellung zur Integration vorausschauender Instandhaltung mittels Maschinenzustandsüberwachung*. Projektarbeit. Erlangen, 15. Juni 2016
- [S23] RIEDMÜLLER, M., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Übertragung der Methodik zur Simulation eines Kalksandsteinwerks auf andere Branchen und Industrien*. Masterarbeit. Erlangen, 11. Juli 2016
- [S24] SCHÄBEN, P., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Basis-Recherche: Simulationsmethoden, -werkzeuge und Modellierungsansätze*. Projektarbeit. Erlangen, 13. Oktober 2014
- [S25] SCHÄBEN, P., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Erstellung eines MS-Excel-Tools zur ressourceneffizienten Steuerung der Werksprozesse in der Baustoffbranche*. Masterarbeit. Erlangen, 10. April 2015
- [S26] SCHMIDT, E., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Kontinuierliche Validierung und Anpassung von Simulationsmodellen auf Basis erfasster Echtzeit-Produktionsdaten*. Projektarbeit. Erlangen, 25. Oktober 2018
- [S27] SCHMIDT, T., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Entwicklung eines integrierten Informations- und Datenmodells zur automatisierten Generierung eines digitalen Zwillings für Fertigungsabläufe*. Masterarbeit. Erlangen, 20. Juli 2018
- [S28] STAMM, A., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Entwicklung von Anwendungskonzepten digitaler Planungswerkzeuge bei einem Automobilzulieferer*. Projektarbeit. Erlangen, 1. Juni 2017

- [S29] VÖLKER, K., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Konzeption einer geeigneten technischen Infrastruktur für die Realisierung eines dynamischen Wertstrommanagements*. Masterarbeit. Erlangen, 30. Juli 2017
- [S30] EHRHARDT, J., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Analyse und Konzept zur optimierten Autoklavenbestückung in Kalksandsteinwerken*. Masterarbeit. Erlangen, 15. Juni 2015
- [S31] FISCHER, F., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Erstellung eines Materialflusssimulationsmodells für ein Kalksandsteinwerk und Vorbereitung zur Erweiterung zum digitalen Zwilling*. Projektarbeit. Erlangen, 17. April 2018
- [S32] HUPRICH, S., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Implementierung eines Webtools zur Erstellung eines Strukturabbilds der Werksprozesse in der Kalksandsteinindustrie*. Bachelorarbeit. Erlangen, 30. November 2014
- [S33] JOBST, C., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Entwicklung von Handlungsvorgaben zur Optimierung des Härteprozesses bei der Herstellung von Kalksandsteinen*. Masterarbeit. Erlangen, 10. März 2015
- [S34] KÖHLER, J., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Erstellung einer intuitiven Benutzeroberfläche für die Eingabe von Bewegungsdaten und Simulationsparametern für das "KS-Cockpit"*. Bachelorarbeit. Erlangen, 1. Mai 2015
- [S35] KURZ, A., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Restrukturierung von Layout und Materialbereitstellung in der Baugruppenmontage der MAN Truck & Bus AG, Werk Nürnberg*. Masterarbeit. Erlangen, 17. Mai 2015
- [S36] LEONTJEV, S., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Verknüpfung eines Tools zur Abbildung des Werkslayouts eines Kalksandsteinwerks mit dem Simulationskern*. Projektarbeit. Erlangen, 24. Mai 2015

- [S37] LINDNER, L., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Erstellung eines Modul-Baukastens in Plant Simulation für die Simulation der Produktionsprozesse eines beliebigen Kalksandsteinwerks*. Projektarbeit. Erlangen, 1. August 2016
- [S38] RÖHNER, N., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Auslegung eines Simulationsmodells zur Abbildung des Transportverfahrens in der Kalksandsteinherstellung*. Projektarbeit. Erlangen, 16. April 2018
- [S39] RUHSAM, J., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Durchführung einer Simulationsstudie zur Ermittlung von Optimierungspotenzialen in den Prozessabläufen einer Industrieräscherei*. Projektarbeit. Erlangen, 5. September 2018
- [S40] SCHAFT, T., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Erstellung einer intuitiven Benutzeroberfläche für die graphische Auswertung von Simulationsergebnissen im "KS-Cockpit*. Projektarbeit. Erlangen, 17. April 2015
- [S41] SCHMIDT, T., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Verfeinerung des Detailgrads und Validierung einer Materialflusssimulation für ein Kalksandsteinwerk*. Projektarbeit. Erlangen, 15. Juli 2017
- [S42] SCHÖNNAGEL, B., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Implementierung einer konfigurierbaren graphischen Darstellung von Ergebnisdaten einer Ablaufsimulation im Kalksandsteinbereich*. Bachelorarbeit. Erlangen, 15. Juni 2015
- [S43] SCHUSTER, J., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Simulation thermischer Energieströme bei der Herstellung von Kalksandsteinen durch Modellierung in einer Materialflusssimulation*. Projektarbeit. Erlangen, 30. Oktober 2017
- [S44] ZEHEND, S., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Konzeptionierung und prototypische Umsetzung einer IT-Lösung zur*

- interaktiven Optimierung von Produktionsplänen*. Masterarbeit. Erlangen, 15. Juli 2015
- [S45] ZEHEND, S., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Simulative Abbildung der Fertigungsabläufe bei der Herstellung von Planelementen in einem Kalksandsteinwerk*. Projektarbeit. Erlangen, 1. Dezember 2014
- [S46] DAUSCH, T., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Entwicklung einer Methodik und eines Tools zur Bildung rüstzeitminimaler Produktfamilien für die Bremsscheibenproduktion*. Masterarbeit. Erlangen, 14. Februar 2018
- [S47] HORNING, S., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Entwicklung eines Vorgehensmodells zur prozesskostenbasierten Losgrößenoptimierung*. Masterarbeit. Erlangen, 15. Februar 2016
- [S48] KAYA, S., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Entwicklung einer Methodik zur Optimierung der Werksprozesse in Kalksandsteinwerken durch Variation der Simulationsparameter*. Bachelorarbeit. Erlangen, 17. April 2015
- [S49] PLAŠIL, M., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Prozessanalyse und -optimierung in hochautomatisierten Intralogistiksystemen*. Masterarbeit. Erlangen, 30. Juni 2017
- [S50] MÜLLER, S., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Dynamische Anpassung eines SCADA-Systems unter Beeinflussung von Plant Simulation und Energiemarktsignalen*. Masterarbeit. Erlangen, 1. Oktober 2017
- [S51] WANG, Z., T. DONHAUSER (Mitarb.) und J. FRANKE (Mitarb.). *Entwicklung einer geeigneten Datenbankstruktur für das KS-Cockpit*. Projektarbeit. Erlangen, 15. April 2016

## Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2020):  
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, [www.mb.fau.de/diss/](http://www.mb.fau.de/diss/)

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52  
Fertigungstechnik – Erlangen  
ISSN 1431-6226  
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307  
Fertigungstechnik – Erlangen  
ISSN 1431-6226  
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308  
FAU Studien aus dem Maschinenbau  
ISSN 2625-9974  
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

<b>FAPS</b>	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
<b>KTmfk</b>	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
<b>LFT</b>	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
<b>LPT</b>	Lehrstuhl für Photonische Technologien

Band 1: Andreas Hemberger  
Innovationspotentiale in der  
rechnerintegrierten Produktion durch  
wissensbasierte Systeme  
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.  
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe  
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität  
automatisierter Montagesysteme  
durch Sensorintegration und erweiterte  
Steuerungskonzepte  
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.  
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting  
Projektierung von Montagesystemen  
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter  
Nutzungsgradsteigerung von  
Montagesystemen durch den Einsatz  
der Simulationstechnik  
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin  
Aufbau von Modellen zur Lageregelung  
von Industrierobotern  
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss  
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-  
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-  
schneiden  
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz  
Modell zur datenbankgestützten Planung  
automatisierter Montageanlagen  
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.  
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier  
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-  
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen  
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele  
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von  
Planungssystemen in der Produktion  
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer  
Technologisch orientierte  
Montageplanung am Beispiel der  
Schraubtechnik  
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.  
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer  
Verteilte Planungssysteme zur  
Flexibilitätssteigerung der  
rechnerintegrierten Teilefertigung  
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam  
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-  
feinplanung  
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen  
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines  
übereutektoiden verschleißfesten Stahls  
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.  
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann  
Untersuchungen zur Anlagen- und  
Prozeßdiagnostik für das Schneiden  
mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.  
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler  
Material- und Datenfluß in einer flexiblen  
Blechbearbeitungszelle  
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake  
Entwicklung eines rechnergestützten  
Diagnosesystems für automatisierte  
Montagezellen  
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel  
Optimierung der Werkzeugbereitstellung  
durch rechnergestützte  
Arbeitsfolgenbestimmung  
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller  
Modellierung und Einsatz von  
Softwaresystemen für rechnergeführte  
Montagezellen  
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende  
Untersuchungen zum Biegeumforme mit  
elastischer Matrize  
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid  
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten  
von Keramikguß mit Industrierobotern  
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.  
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer  
Multiprozessorsteuerung für  
kooperierende Industrieroboter in  
Montagezellen  
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer  
Entwicklung problemspezifischer  
Verfahrensketten in der Montage  
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr  
Beitrag zur optimalen  
Verbindungstechnik in der  
Oberflächenmontage (SMT)  
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief  
Untersuchungen zur Verfahrensfolge  
Laserstrahlschneiden und -schweißen  
in der Rohkarosseriefertigung  
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.  
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim  
Rechnerunterstützte Optimierung  
von Materialflußstrukturen in der  
Elektronikmontage durch Simulation  
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller  
CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von  
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen  
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.  
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer  
Integrierte Informationsverarbeitung  
bei der Montageplanung  
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann  
Entwicklung einer  
CAD/CAM-Prozesskette für die  
Herstellung von Blechbiegeteilen  
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann  
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden  
und -schweißen: Prozeßführung und  
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-  
beitung von Blechformteilen  
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.  
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel  
Flexible Werkstattsteuerung mit  
objektorientierten Softwarestrukturen  
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch  
Planungs- und Steuerungswerkzeuge  
zur impliziten Geräteprogrammierung  
in Roboterzellen  
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther  
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-  
kationsverhaltens von Automatisierungs-  
geräten in flexiblen Produktionszellen  
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless  
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik  
in der Strahlführung einer  
CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.  
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel  
Entwicklung und Einsatz eines Simula-  
tionsverfahrens für operative und  
strategische Probleme der  
Produktionsplanung und -steuerung  
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.  
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann  
Operatives Fertigungscontrolling durch  
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-  
tungsabläufe in der Elektronikfertigung  
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.  
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra  
Entwicklung eines benutzerorientierten  
Werkstattprogrammiersystems für das  
Laserstrahlschneiden  
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.  
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels  
Modellierung und Optimierung von  
Montageanlagen in einem integrierten  
Simulationssystem  
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.  
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel  
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-  
der Durchgangslöcher  
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.  
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz  
Oberflächenfeinbearbeitung  
keramischer Werkstoffe mit  
XeCl-Excimerlaserstrahlung  
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.  
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp  
Rechnerunterstützung bei Test und  
Schulung an Steuerungssoftware von  
SMD-Bestücklinien  
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch  
Wissensbasierte Unterstützung der  
Angebotsbearbeitung in der  
Investitionsgüterindustrie  
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp  
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim  
Schneiden mit einem gepulsten  
Nd:YAG-Laser  
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel  
Optische 3D-Konturerfassung und  
on-line Biegewinkelmessung mit  
dem Lichtschnittverfahren  
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt  
Modulares Planungssystem zur  
Optimierung der Elektronikfertigung  
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner  
Adaptive Diagnose in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann  
Beitrag zur automatisierten  
Handhabungsplanung komplexer  
Blechbiegeteile  
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf  
Zielkostenorientierte Montageplanung  
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher  
Konzept zur rechnerintegrierten  
Materialversorgung in flexiblen  
Fertigungssystemen  
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska  
Wissensbasierte Analyse und  
Klassifizierung von Blechteilen  
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.  
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke  
Integrierte Entwicklung neuer  
Produkt- und Produktionstechnologien  
für räumliche spritzgegossene  
Schaltungsträger (3-D MID)  
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller  
Sensorplanung und schnelle  
Sensorregelung für Industrieroboter  
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.  
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie  
Zeitbehandlung und  
Multimedia-Unterstützung in  
Feldkommunikationssystemen  
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.  
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel  
Reengineering in der Elektro- und  
Elektronikindustrie  
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn  
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung  
mit Excimerlasern - Systemkomponenten  
und Verfahrensoptimierungen  
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth  
Laserstrahlhartlöten mit  
Zweistrahlschweißtechnik  
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr  
Steuerung und Sensordatenintegration  
für flexible Fertigungszellen mit  
kooperierenden Robotern  
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer  
Berührungslose Formgebung mit  
Laserstrahlung  
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.  
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz  
Fertigungsqualität beim  
3D-Laserstrahlschweißen von  
Blechformteilen  
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs  
Integration elektromechanischer  
CA-Anwendungen über einem  
STEP-Produktmodell  
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm  
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung  
in der Elektronikproduktion  
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand  
Prozesse und Systeme zur Bestückung  
räumlicher elektronischer Baugruppen  
(3D-MID)  
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf  
Regelung der Laserstrahlleistung und  
der Fokusparameter einer  
CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser  
Modulares Informationsmanagement  
in der integrierten Produkt- und  
Prozeßplanung  
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl  
Integriertes Automatisierungskonzept  
für den flexiblen Materialfluß in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto  
Transiente Prozesse beim  
Laserstrahlschweißen  
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl  
Erweiterte Informationsbereitstellung  
an offenen CNC-Steuerungen zur  
Prozeß- und Programoptimierung  
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf  
Verbesserte Prozeßführung und  
Prozeßplanung zur Leistungs- und  
Qualitätssteigerung beim  
Spulenwickeln  
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes  
Technologieorientierte Bahnplanung  
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung  
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus  
Laserstrahlumformen von Profilen  
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer  
Adaptive Strahlführungen für  
CO<sub>2</sub>-Laseranlagen  
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber  
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler  
Schraubstationen in der  
automatisierten Montage  
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf  
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen  
in der Umformtechnik  
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.  
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke  
Integrierte Planung und Konstruktion  
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung  
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller  
Automatisierte Demontagesysteme  
und recyclinggerechte Produktgestaltung  
elektronischer Baugruppen  
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meißner  
Kaltmassivumformung metallischer  
Kleinstteile - Werkstoffverhalten,  
Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung  
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher  
Prozeß- und Systemtechnik zum  
Laserstrahl-Mikroschweißen  
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind  
Zerstörungsfreie Ermittlung mechani-  
scher Eigenschaften von Feinblechen mit  
dem Wirbelstromverfahren  
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard  
Qualitätssteigerung in der  
Elektronikproduktion durch  
Optimierung der Prozeßführung  
beim Löten komplexer Baugruppen  
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh  
Methodische Einbindung der Simulation  
in die betrieblichen Planungs- und  
Entscheidungsabläufe  
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn  
Meßeinrichtung zur Untersuchung  
der Wirkflächenreibung bei umformtech-  
nischen Prozessen  
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert  
Regelung der Fokuslage beim Schweißen  
mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern unter  
Einsatz von adaptiven Optiken  
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo  
Development and Implementation of  
Hierarchical Control Structures of  
Flexible Production Systems Using High  
Level Petri Nets  
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt  
Effizienzsteigerung bei Demontage  
und Recycling durch flexible  
Demontagetechologien und optimierte  
Produktgestaltung  
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz  
Modelle und effiziente Modellbildung  
zur Qualitätssicherung in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs  
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.  
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau  
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals  
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn  
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger  
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher  
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet  
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart  
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans  
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler  
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker  
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein  
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger  
Herstellungs- und Prüfverfahren für  
thermoplastische Schaltungsträger  
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach  
Beitrag zur rechnerunterstützten  
verursachungsgerechten  
Angebotskalkulation von Blechteilen  
mit Hilfe wissensbasierter Methoden  
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.  
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach  
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung  
der Anschlußgeometrie elektronischer  
SMT-Bauelemente  
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk  
Simulationsbasierte  
Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge  
der Kaltmassivumformung  
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl  
Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und  
Anlagenplanung  
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel  
Ermüdungsbruchversagen  
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle  
in der Kaltmassivumformung  
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.  
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert  
Simulationsgestützte Prozessauslegung  
für das Innenhochdruck-Umformen  
von Blechpaaren  
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.  
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer  
Modulares Planungswerkzeug zum  
Produktionsmanagement in der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-139-3.  
Band 111: Jürgen Göhringer  
Integrierte Telediagnose via Internet  
zum effizienten Service von  
Produktionssystemen  
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-147-4.

Band 105: Thomas Hennige  
Flexible Formgebung von Blechen  
durch Laserstrahlumformen  
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel  
Wissensbasierte Methoden für die  
rechnergestützte Charakterisierung  
und Bewertung innovativer  
Fertigungsprozesse  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel  
Kommunikationstechnische Integration  
der Prozeßebene in Produktionssysteme  
durch Middleware-Frameworks  
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter  
Verfügbarkeitssteigerung von  
Werkzeugmaschinen durch Einsatz  
mechatronischer Sensorlösungen  
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli  
Integration lokaler CAP-Systeme in  
einen globalen Fertigungsdatenverbund  
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller  
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -  
Prozeßparameter und Modelle zur  
Aktorkonstruktion  
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer  
Integrierte Telediagnose via Internet  
zum effizienten Service von  
Produktionssystemen  
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein  
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-  
tion neuer Bauelementetechnologien in  
die Flachbaugruppenfertigung  
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger  
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten  
alternativer Elektroniklote in der  
Oberflächenmontage (SMT)  
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber  
Justieren vormontierter Systeme mit dem  
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren  
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi  
Analyse und Optimierung von Montage-  
systemen in der Elektronikproduktion  
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein  
Laserstrahlumformen von  
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung  
der Mikrostruktur und  
der mechanischen Eigenschaften  
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.  
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi  
Ein informationslogistisches  
Architekturkonzept zur Akquisition  
simulationsrelevanter Daten  
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch  
Rationalisierung und ergonomische  
Optimierung im Innenausbau durch  
den Einsatz moderner  
Automatisierungstechnik  
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt  
Prozeßregelung für das Laserstrahl-  
Punktschweißen in der Elektronikpro-  
duktion  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Fließpressen metallischer Kleinstteile  
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche  
Methoden zur technologieorientierten  
Programmierung für  
die 3D-Lasermikrobearbeitung  
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel  
Prozeßkontrolle beim  
Laserstrahl-Mikroschweißen  
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel  
Prozeßkontrolle und -steuerung beim  
Laserstrahlschweißen mit den Methoden  
der nichtlinearen Dynamik  
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer  
Laserstrahlunterstützte Erzeugung  
metallischer Leiterstrukturen auf  
Thermoplastsubstraten für die  
MID-Technik  
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein  
Qualität laserstrahl-gefügter  
Mikroverbindungen elektronischer  
Kontakte  
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium  
für Komponenten der Optoelektronik  
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich  
Simultanes Löten von Anschlußkontak-  
ten elektronischer Bauelemente mit  
Diodenlaserstrahlung  
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann  
Erweiterung der Formgebungsgrenzen  
beim Umformen von  
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-  
satz prozessangepasster Platinen  
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch  
3 - D MID Technologie in der  
Automobilelektronik  
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl  
Fertigungsqualität und Umformbarkeit  
laserstrahlgeschweißter Formplatinen  
aus Aluminiumlegierungen  
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk  
Entwicklung eines konfigurierbaren  
Steuerungssystems für die flexible  
Sensorführung von Industrierobotern  
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck  
Neue Sensorik und Aktorik für  
Bearbeitungsköpfe zum  
Laserstrahlschweißen  
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis  
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-  
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-  
men, Trennen und Laserstrahlschweißen  
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und  
multimediale Präsentation  
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner  
Technische Umsetzung produktbezoge-  
ner Instrumente der Umweltpolitik bei  
Elektro- und Elektronikgeräten  
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier  
Strategien für einen produktorientierten  
Einsatz räumlicher spritzgegossener  
Schaltungsträger (3-D MID)  
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich  
Kostensimulation - Simulationsbasierte  
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer  
Produktionssysteme  
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny  
Innenhochdruck-Umformen von Blechen  
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-  
rungen bei erhöhter Temperatur  
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.  
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha  
Flexible Montageautomatisierung zur  
Komplettmontage flächenhafter Produkt-  
strukturen durch kooperierende  
Industrieroboter  
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth  
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und  
Verbindungstechnik für mechatronische  
Baugruppen  
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph  
Durchgängige simulationsgestützte  
Planung von Fertigungseinrichtungen der  
Elektronikproduktion  
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah  
Simulationsbasierte Bestimmung der  
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das  
Blechbiegen  
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein  
Scherschneiden und Biegen metallischer  
Kleinstteile - Materialeinfluss und  
Materialverhalten  
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff  
Excimerlaserstrahlbiegen dünner  
metallischer Folien mit homogener  
Lichtlinie  
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.  
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach  
Rechnergestützte Anpassung von  
Laserstrahlschneidbahnen  
an Bauteilabweichungen  
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl  
System- und Prozesstechnik für das  
simultane Löten mit Diodenlaserstrah-  
lung von elektronischen Bauelementen  
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker  
Tribologische Eigenschaften keramischer  
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer  
Oberflächenendbearbeitung mittels  
Excimerlaserstrahlung  
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger  
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik  
durch innovative maschinenbauliche und  
regelungstechnische Ansätze  
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama  
Effizienzsteigerung in der Montage durch  
marktorientierte Montagestrukturen und  
erweiterte Mitarbeiterkompetenz  
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm  
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-  
wicklung von Konzepten und Methoden  
für die rechnerunterstützte Modellierung  
und Optimierung von komplexen  
Aktorsystemen in der Mikrotechnik  
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini  
Wirkmedienbasierte Blechumformung:  
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss  
von Werkstoff und Bauteilgeometrie  
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein  
Entwurf hochdynamischer Sensor- und  
Regelsysteme für die adaptive  
Laserbearbeitung  
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.  
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer  
Entwicklung prozessüberwachender  
Regelkreise für flexible  
Formgebungsprozesse  
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer  
Massivumformen metallischer Kleinst-  
teile bei erhöhter Prozesstemperatur  
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann  
Strategien zur nachhaltigen Optimierung  
von Qualität und Zuverlässigkeit in  
der Fertigung hochintegrierter  
Flachbaugruppen  
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock  
Biegeumformen mit  
Elastomerwerkzeugen Modellierung,  
Prozessauslegung und Abgrenzung des  
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens  
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling  
Qualifizierung einer Prozesskette zum  
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile  
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler  
Großserientauglichkeit trockenschmier-  
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im  
Presswerk Grundlegende Untersuchun-  
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-  
ten und Bauteilversuche  
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto  
Solution Approaches for Planning of  
Assembly Systems in Three-Dimensional  
Virtual Environments  
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger  
Hochleistungssysteme für die Fertigung  
elektronischer Baugruppen auf der Basis  
flexibler Schaltungsträger  
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz  
Laserunterstütztes Biegen höchstfester  
Mehrphasenstähle  
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl  
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des  
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-  
Umformen von Blechen  
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus  
Plattformstrategien - Realisierung  
einer varianz- und kostenoptimierten  
Wertschöpfung  
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser  
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-  
lyse und -modellierung  
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-  
turen mit Aluminiumschaumkern  
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos  
Mechatronische Ansätze zur Optimie-  
rung von Vorschubachsen  
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark  
Auslegung und Fertigung hochpräziser  
Faser-Kollimator-Arrays  
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou  
Kollaboratives Engineering Management  
in der integrierten virtuellen Entwicklung  
der Anlagen für die Elektronikproduktion  
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser  
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen  
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer  
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle  
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.  
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz  
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall  
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl  
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik  
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert  
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung  
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller  
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile  
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann  
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen  
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick  
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen  
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi  
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods  
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp  
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen  
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel  
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter  
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl  
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse  
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo  
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)  
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang  
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion  
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß  
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere  
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker  
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten  
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer  
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse  
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht  
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge  
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß  
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen  
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch  
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten  
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber  
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme  
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick  
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen  
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht  
Werkstoffcharakterisierung und  
Prozessauslegung für die wirkmedienba-  
sierte Doppelblech-Umformung von  
Magnesiumlegierungen  
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl  
Stochastische Simulation zur Werkzeug-  
lebensdaueroptimierung und Präzisions-  
fertigung in der Kaltmassivumformung  
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi  
Innenhochdruck-Umformen verstärkter  
Blech-Rahmenstrukturen  
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff  
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen  
beim Presshärten des höchstfesten  
Vergütungsstahls 22MnB5  
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez  
Simulationsgestützte Methoden zur  
effizienten Gestaltung von Lötprozessen  
in der Elektronikproduktion  
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze  
Automatisierte Montage von makrome-  
chatronischen Modulen zur flexiblen  
Integration in hybride  
Pkw-Bordnetzsysteme  
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter  
Grundlegende Untersuchungen zur  
experimentellen Ermittlung und zur  
Modellierung von Fließortkurven bei  
erhöhten Temperaturen  
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl  
Entwicklung, angepasste Herstellungs-  
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-  
rung von einsetzgerechten elektroni-  
schen Baugruppen  
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter  
Flüssigkeitsfilmen  
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera  
Prozesstechnische Untersuchungen  
zum Rührreibschweißen metallischer  
Werkstoffe  
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler  
Beschreibung und Modellierung  
des Werkstoffverhaltens von  
presshärtbaren Bor-Manganstählen  
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl  
Untersuchungen zur Erhöhung der  
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-  
druck-Umformung von flächigen Halb-  
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten  
Laserstrahlfügeoperationen  
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller  
Modellierung eines nachfrageorientierten  
Produktionskonzeptes für mobile  
Telekommunikationsgeräte  
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf  
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-  
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-  
beitsprozessen in der Elektronikproduk-  
tion  
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich  
Sensoriken zur Schwerpunktlagebestim-  
mung der optischen Prozessemissionen  
beim Laserstrahliefschweißen  
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf  
Entwicklung eines agentenbasierten  
Steuerungssystems zur  
Materialflussorganisation im  
wandelbaren Produktionsumfeld  
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.  
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster  
Laserdurchstrahlenschweißen  
transparenter Polymerbauteile  
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler  
Rührreibschweißen von walzplattiertem  
Halbzeug und Aluminiumblech zur  
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-  
Sandwich-Verbundstrukturen  
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt  
Seriennahe Auslegung von Aluminium  
Tailored Heat Treated Blanks  
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann  
Qualitative und quantitative Bewertung  
der Crashtauglichkeit von höchstfesten  
Stählen  
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl  
Größeneffekte bei Biegeprozessen-  
Entwicklung einer Methodik zur  
Identifikation und Quantifizierung  
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud  
Effiziente Prozesskettenauslegung für das  
Umformen lokal wärmebehandelter und  
geschweißter Aluminiumbleche  
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann  
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-  
schweißen thermoplastischer Kunststoffe  
LFT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Kontaktzustand zwischen Werkstück  
und Werkzeug bei umformtechnischen  
Prozessen unter tribologischen  
Gesichtspunkten  
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer  
Entwicklung eines mesoskopischen  
Modells zur Abbildung von Größeneffek-  
ten in der Kaltmassivumformung mit  
Methoden der FE-Simulation  
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner  
Konzeption produktspezifischer Lösun-  
gen zur Robustheitssteigerung elektroni-  
scher Systeme gegen die Einwirkung von  
Betaung im Automobil  
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler  
Verbindungs- und Systemtechnik für  
thermisch hochbeanspruchte und  
miniaturisierte elektronische Baugruppen  
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti  
Strategien zur Erweiterung der Prozess-  
grenzen bei der Innhochdruck-Umform-  
ung von Rohren und Blechpaaren  
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke  
Mehrkriterielle Optimierung komplexer  
Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren  
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke  
Flexible Automatisierungslösungen für  
die Fertigung wickeltechnischer Produkte  
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam  
Optical Tissue Differentiation for  
Sensor-Controlled Tissue-Specific  
Laser Surgery  
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch  
Potenziale und Strategien zur Optimie-  
rung des Schablonendruckprozesses in  
der Elektronikproduktion  
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald  
Quasi-isothermes Laserstrahlintern von  
Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine  
Betrachtung werkstoff-prozessspezifi-  
scher Aspekte am Beispiel PEEK  
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan  
Prozesse und Systemlösungen für die  
SMT-Montage optischer Bauelemente auf  
Substrate mit integrierten Lichtwellenlei-  
tern  
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner  
Beanspruchungsangepasste  
Kaltmassivumformwerkzeuge durch  
lokal optimierte Werkzeugoberflächen  
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber  
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-  
sagens von Punktschweißverbindungen  
bei höchstfesten Stahlgüten  
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser  
Ein Ansatz zur Herstellung von  
pressgehärteten Karosseriekomponenten  
mit maßgeschneiderten mechanischen  
Eigenschaften: Temperierte Umform-  
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-  
lation und funktionale Untersuchung  
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak  
Material Adapted Design of Cold Forging  
Tools Exemplified by Powder  
Metallurgical Tool Steels and Ceramics  
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz  
Beschleunigte Simulation des  
Laserstrahlumformens von  
Aluminiumblechen  
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm  
Prozessanalyse und -überwachung des  
Laserstrahlhartlötens mittels optischer  
Sensorik  
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kupper  
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-  
stoffen - Umformverhalten und Grenzen  
der Biegebarkeit  
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß  
Modellbasierte Prozessauslegung für  
die Kaltmassivumformung unter  
Brücksichtigung der Werkzeug- und  
Pressenauffederung  
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth  
Analyse und Optimierung der Entwick-  
lung und Zuverlässigkeit räumlicher  
Schaltungsträger (3D-MID)  
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler  
Ganzheitliche Automatisierung  
mechatronischer Systeme in der Medizin  
am Beispiel Strahlentherapie  
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert  
Automatisiertes Laserstrahllöten  
und -reparaturlöten elektronischer  
Baugruppen  
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.  
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr  
Analyse und Beschreibung des  
mechanischen Werkstoffverhaltens  
von presshärtbaren Bor-Manganstählen  
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler  
Prozessdynamik beim  
Laserstrahlschweißen verzinkter  
Stahlbleche im Überlappstoß  
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger  
Seriennahe Auslegung der Prozesskette  
zur wärmeunterstützten Umformung  
von Aluminiumblechwerkstoffen  
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel  
Herstellung prozessangepasster  
Halbzeuge mit variabler Blechdicke  
durch die Anwendung von Verfahren  
der Blechmassivumformung  
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade  
In-vivo Monitoring of Epithelium  
Vessel and Capillary Density for the  
Application of Detection of Clinical  
Shock and Early Signs of Cancer Develop-  
ment  
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse  
Entwicklung und Qualifizierung eines  
Schneidclinchverfahrens  
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz  
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz  
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung  
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl  
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen  
technischen Diagnose  
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm  
Einfluss von Chargenschwankungen  
auf die Verarbeitungsgrenzen von  
Stahlwerkstoffen  
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.  
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel  
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau  
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann  
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk  
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin  
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen  
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht  
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen  
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel  
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium  
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen  
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung  
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil  
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren  
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl  
Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik  
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht  
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen  
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch  
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles  
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl  
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen  
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder  
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen  
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt  
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger  
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck  
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation  
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.  
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller  
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen  
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke  
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren  
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner  
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium  
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.  
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock  
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition  
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter  
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode  
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl  
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung  
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke  
Transiente physikalische Mechanismen  
bei der Laserablation von dünnen  
Metallschichten  
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz  
Community-basierte Optimierung des  
Anlagenengineerings  
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen  
Qualifizierung des Potentials von  
Verfestigungseffekten zur Erweiterung  
des Umformvermögens aushärtbarer  
Aluminiumlegierungen  
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert  
Erweiterung und Verbesserung von Ver-  
suchs- und Auswertetechniken für die  
Bestimmung von Grenzformänderungs-  
kurven  
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus  
Erstellung eines Werkstofforientierten  
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung  
des Formgebungsvermögens von Alumi-  
niumlegierungen unter Anwendung einer  
zwischeneschalteten Wärmebehandlung  
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec  
Untersuchungen zur Herstellung von  
funktionsoptimierten Bauteilen im  
partiellen Presshärtprozess mittels lokal  
unterschiedlich temperierter Werkzeuge  
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Verschleißcharakterisierung beschichte-  
ter Kaltmassivumformwerkzeuge  
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela  
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-  
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-  
fungsoptimierung und Fehlerdetektion  
an magnetischen Aktoren  
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland  
Entwicklung einer Methode zur Prognose  
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen  
für das direkte Presshärten  
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm  
Strukturierte additive Metallisierung  
durch kaltaktives  
Atmosphärendruckplasma  
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner  
Herstellung beanspruchungsangepasster  
Aluminiumblechhalbzeuge durch  
eine maßgeschneiderte Variation der  
Abkühlgeschwindigkeit nach  
Lösungsglühen  
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas  
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit  
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim  
Kaltfließpressen  
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum  
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles  
for the Generation of Thin Conductive  
Layers on Transparent Substrates  
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider  
Umformtechnische Herstellung  
dünnwandiger Funktionsbauteile  
aus Feinblech durch Verfahren der  
Blechmassivumformung  
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof  
Sematische Modellierung automatisierter  
Produktionssysteme zur Verbesserung  
der IT-Integration zwischen Anlagen-  
Engineering und Steuerungsebene  
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.  
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller  
Erarbeitung von Grundlagen zur  
Abbildung des tribologischen Systems  
in der Umformsimulation  
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler  
Einsatz technologischer Versuche zur  
Erweiterung der Versagensvorhersage  
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten  
Stählen  
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig  
Integration des Systemverhaltens von  
Automobil-Hochvoltleitungen in die  
virtuelle Absicherung durch  
strukturmechanische Simulation  
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl  
Automatisierte Datenerfassung für disk-  
ret ereignisorientierte Simulationen in  
der energieflexiblen Fabrik  
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold  
Mikroschockwellenumformung mittels  
ultrakurzer Laserpulse  
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger  
Laserstrahlschweißen thermoplastischer  
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit  
spezifischem Zusatzdraht  
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl  
Methods-Energy Measurement - Eine  
Methode zur Energieplanung für  
Fügeverfahren im Karosseriebau  
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow  
Erweiterung des Unternehmenscontrol-  
lings um die Dimension Energie  
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung zyklisch-symmetrischer  
Bauteile mit Nebenformelementen durch  
Blechmassivumformung  
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann  
Beitrag zur Untersuchung der  
tribologischen Bedingungen in der  
Blechmassivumformung - Bereitstellung  
von tribologischen Modellversuchen und  
Realisierung von Tailored Surfaces  
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner  
Methodik zur virtuellen Absicherung  
der formgebenden Operation des  
Nasspressprozesses von  
Gelege-Mehrschichtverbunden  
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein  
Der grundoperationsspezifische  
Mindestenergiebedarf als Referenzwert  
zur Bewertung der Energieeffizienz in  
der Produktion  
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos  
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter  
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie  
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis  
Thermisch unterstützte Umformung von  
Aluminiumblechen  
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel  
Flexible Systems for Permanent  
Magnet Assembly and Magnetic Rotor  
Measurement / Flexible Systeme zur  
Montage von Permanentmagneten und  
zur Messung magnetischer Rotoren  
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.  
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis  
Schädigungs- und Versagensverhalten  
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter  
Biegebeanspruchung  
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Prozessverhalten von Silizium als  
Werkzeugwerkstoff für das  
Mikroscherschneiden metallischer Folien  
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck  
Zeitliche Pulsformung in der  
Lasermikromaterialbearbeitung –  
Grundlegende Untersuchungen und  
Anwendungen  
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto  
Mechatronic Simulation Approach for  
the Process Planning of Energy-Efficient  
Handling Systems  
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel  
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik  
für verteilte Wicklungen im  
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe  
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić  
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung  
montageführender Werkerinformations-  
systeme simultan zum  
Produktentstehungsprozess  
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus  
Hochpräzise adaptive Steuerung und  
Regelung robotergeführter Prozesse  
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer  
Erzeugung von thermoplastischen  
Werkstoffverbunden mittels simultanem,  
intensitätsselektivem  
Laserstrahlschmelzen  
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger  
Untersuchung einer thermisch unter-  
stützten Fertigungskette zur Herstellung  
umgeformter Bauteile aus der höherfes-  
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020  
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin  
Design of Manufacturing Processes for  
the Cold Bulk Forming of Small Metal  
Components from Metal Strip  
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy  
Experimental Investigation, Modeling,  
Simulation and Optimization of Molded  
Interconnect Devices (MID) Based on  
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-  
mentelle Untersuchung, Modellierung,  
Simulation und Optimierung von Molded  
Interconnect Devices (MID) basierend  
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)  
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr  
Automatisierte Kontaktierungsverfahren  
für flachleiterbasierte  
Pkw-Bordnetzsysteme  
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner  
Charakterisierung und Modellierung  
des spannungszustandsabhängigen  
Werkstoffverhaltens der Magnesium-  
legierung AZ31B für die numerische  
Prozessauslegung  
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar  
A reliable methodology to deduce  
thermo-mechanical flow behaviour of  
hot stamping steels  
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler  
Steuerung von Blechmassivumformpro-  
zessen durch maßgeschneiderte  
tribologische Systeme  
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller  
Untersuchung des kombinierten Trenn-  
und Umformprozesses beim Fügen art-  
ungleicher Werkstoffe mittels  
Schneidlinchverfahren  
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.  
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle  
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-  
technologie für integrierte Leistungs-  
module in harschen Umgebungs-  
bedingungen  
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc  
Eine Simulationsmethode für das  
3-Rollen-Schubbiegen  
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer  
Arbeitsraumüberwachung und autonome  
Bahnplanung für ein sicheres und  
flexibles Roboter-Assistenzsystem  
in der Fertigung  
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer  
Der Einfluss von Poren auf die  
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen  
von Hochleistungs-Leuchtdioden  
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner  
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche  
LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja  
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics  
FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.  
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub  
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung  
LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel  
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung  
LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand  
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess  
LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad  
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen  
LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel  
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge  
FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann  
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile  
LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann  
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden  
LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner  
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen  
LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller  
Mapping Individual Subjective Values to Product Design  
KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz  
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation  
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl  
Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbauteile  
LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner  
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher  
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm  
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge  
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer  
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip  
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp  
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung  
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz  
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten  
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner  
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung  
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger  
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion  
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn  
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)  
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab.  
2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann  
Modellbasierte Zustands- und Prozess-  
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-  
sischer Systeme  
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.  
2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Prozess- und Werkstoffverhalten bei  
schwingungsüberlagerter Umformung  
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab.  
2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier  
Ganzheitliches ontologiebasiertes  
Wissensmanagement im Umfeld der  
industriellen Produktion  
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab.  
2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr  
Datenerfassung für die Anwendung  
lernender Algorithmen bei der Herstel-  
lung von Blechformteilen  
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab.  
2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener  
Kaltfließpressen von gerad- und schräg-  
verzahnten Zahnrädern  
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng  
Numerische, analytische und empirische  
Modellierung des Heißscrimpprozesses  
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl  
Erarbeitung eines Prozessverständnisses  
zur Verbesserung der tribologischen  
Bedingungen beim Presshärten  
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti  
Evaluation of failure behaviour  
of sheet metals  
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung hochfester Aluminiumblech-  
bauteile in einem kombinierten Umform-  
und Abschreckprozess  
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner  
Automatische Bahnplanung für die Auf-  
teilung von Prozessbewegungen in syn-  
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-  
gungen mittels Multi-Roboter-Systemen  
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter  
Qualifizierung des Montageprozesses  
hochminiaturisierter elektronischer Bau-  
elemente  
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser  
Ressourcenorientierte Auftragsregelung  
in einer hybriden Produktion mittels  
betriebsbegleitender Simulation  
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

# Abstract

Modern production systems must be capable of reacting to changing environments within minimum time. This requires a high degree of transparency and responsiveness, especially in production control, so that inefficiencies can at best be identified early and avoided proactively. In order to facilitate this even in complex, multi-stage manufacturing processes, a production-synchronous digital twin is required which is equipped with forecasting and optimization competencies.

This dissertation provides a holistic methodology for the efficient processing of manufacturing orders in a hybrid production environment, even in case of unforeseen deviations, by using simulation-based optimization methods during operation. This novel approach no longer controls production based on planning data and reacts with locally optimal solutions, but continuously adapts the system to an overall optimum by integrating real-time data.

Discrete-event simulation methods at its core are enriched with runtime-efficient modelling for fluid-like bulk materials as well as a material flow control based on thermodynamic models in order to ensure a sufficient level of detail for use with short-term problems. Due to the integrated energy simulation, the real dependencies in the hardening process can be taken into account with sufficient accuracy in the material flow simulation. By adding specific optimization methods to this time-dynamic modeling, it is possible to automate the decision-making process during simulation. Finally, a real-time representation of the production is available at any time in the simulation model through a suitable coupling with decentrally provided production data. On this basis, the adherence to the production targets can be continuously monitored and the production plan can be ad-justed proactively when an intervention is required.

Comprehensive experimental investigations within the course of case studies in calcium silicate masonry plants ensure the validity and applicability of the developed methodology. Its generic design and the establishment of a building block library for the simulation of hybrid production processes allow an immediate transfer to other industrial sectors.

Moderne Produktionssysteme müssen in der Lage sein, innerhalb kürzester Zeit auf sich ändernde Rahmenbedingungen zu reagieren. Dies erfordert insbesondere in der Fertigungssteuerung ein hohes Maß an Transparenz und Reaktionsfähigkeit, sodass Ineffizienzen bestenfalls frühzeitig erkannt und proaktiv umgangen werden. Um dies auch bei komplexen, mehrstufigen Fertigungsprozessen zu ermöglichen, ist ein produktionssynchroner digitaler Zwilling erforderlich, der mit Vorausschau- und Optimierungskompetenz ausgestattet ist.

Die vorliegende Dissertationsschrift zeigt hierzu eine ganzheitliche Methodik auf, wie Fertigungsaufträge in einer hybriden Produktion durch den Einsatz von betriebsbegleitenden simulationsgestützten Optimierungsverfahren auch bei unvorhergesehenen Abweichungen effizient durchgeführt werden können. Dieser neuartige Ansatz steuert die Produktion nicht mehr auf Basis von Plandaten und reagiert bei Bedarf mit bereichsoptimalen Lösungen, sondern regelt das System durch Integration von Echtzeitdaten kontinuierlich auf ein Gesamtoptimum hin.

Ereignisdiskrete Simulationsverfahren im Kern dieser Methodik sind mit einer laufzeiteffizienten Modellierung für fluidähnliches Schüttgut sowie einer auf thermodynamischen Modellen basierenden Materialflusssteuerung versehen, um einen hinreichenden Detailgrad für den Einsatz bei kurzfristigen Problemstellungen zu gewährleisten. Dank der enthaltenen Energiesimulation können die realen Abhängigkeiten im Härteprozess hinreichend genau in der Materialflusssimulation berücksichtigt werden. Durch die Ergänzung spezifischer Optimierungsverfahren in diese zeitdynamische Modellierung gelingt es, die Entscheidungsfindung beim Simulationseinsatz zu automatisieren. Zuletzt liegt durch eine geeignete Verknüpfung mit dezentral bereitgestellten Produktionsdaten zu jeder Zeit ein Echtzeitabbild der Produktion im Simulationsmodell vor. Auf dessen Basis kann die Einhaltung der Produktionsziele kontinuierlich überprüft und der Produktionsplan bei Bedarf vorausschauend angepasst werden.

Umfassende experimentelle Untersuchungen im Rahmen von Fallstudien in Kalksandsteinwerken stellen die Validität und Einsetzbarkeit der entwickelten Methodik sicher. Zudem ermöglicht deren generische Gestaltung sowie die Einrichtung einer Bausteinbibliothek für die Simulation hybrider Fertigungsprozesse eine unmittelbare Übertragung auf weitere Industriezweige.

