

Simon Goy

Stand-by-Betrieb von Maschinen und Anlagen

**Entwicklung eines Stand-by-Managers zur
energieeffizienten Produktionssteuerung**



Produktion & Energie

Band 13

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach

Simon Goy

Stand-by-Betrieb von Maschinen und Anlagen

Entwicklung eines Stand-by-Managers
zur energieeffizienten Produktionssteuerung

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm

Weitere Mitglieder der Prüfungskommission:
Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier
Prof. Dr. phil. Oliver Sträter

Tag der mündlichen Prüfung

05. September 2016

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

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2016
ISBN: 978-3-7376-0208-2 (print)
ISBN: 978-3-7376-0209-9 (e-book)
DOI: <http://dx.medra.org/10.19211/KUP9783737602099>
URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-402090>

© 2016, kassel university press GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de

Umschlaggestaltung: Karen Marschinke, Formkonfekt, Kassel
Druck und Verarbeitung: docupoint GmbH, Barleben
Printed in Germany

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Umweltgerechte Produkte und Prozesse des Instituts für Produktionstechnik und Logistik der Universität Kassel. Diese prägende und sehr schöne Zeit verdanke ich meinen tollen Kollegen und meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater für die stetige Unterstützung, die geschaffenen Möglichkeiten und Freiräume sowie das Mentoring für die geplante Unternehmensgründung.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm vom Fachgebiet Trennende und Fügende Fertigungsverfahren für die Übernahme des Zweitgutachtens, sowie den Mitberichtern Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier und Herrn Prof. Dr. phil. habil. Oliver Sträter.

Weiterhin danke ich allen die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, insbesondere Wolfgang Peter und Ho-Man Lau.

Danken möchte ich ebenso meinen Eltern und meiner Freundin, die mich stets unterstützt und gefördert haben.

Simon Goy

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Grundlagen der Arbeit.....	5
2.1 Fertigungsprozesse in der mechanischen Bearbeitung	5
2.1.1 Werkzeugmaschinen	6
2.1.2 Produktionsleitsysteme	12
2.2 Materialflusssysteme der Automobilindustrie	14
2.2.1 Ablaufarten der Teilefertigung	15
2.2.2 Produktionssteuerung/Fertigungssteuerung	16
2.3 Stand-by-Strategien im industriellen Umfeld	17
2.3.1 Thematische Abgrenzung	21
3 Basisdaten und deren Analyse.....	23
3.1 Basisdaten	24
3.2 Informationsgewinnung aus Energiedaten	25
3.2.1 Merkmalbeschreibung von Leistungsprofilen	26
3.2.2 Stückzahl und Pausenermittlung	30
3.2.3 Materialflussermittlung.....	31
3.2.4 Prozessüberwachung.....	32
3.3 Potenzialstudie.....	33

3.3.1	Messkonzept	34
3.3.2	Ergebnisse Potenzialstudie Top-down	35
3.3.3	Ergebnisse Potenzialstudie Bottom-up	36
3.3.4	Potenzialstudie Stand-by-Betrieb	46
4	Entwicklung eines Stand-by-Managers	49
4.1	Referenzsystem	49
4.2	Konzeptbeschreibung	51
4.2.1	Funktionsprinzip	53
4.2.2	Funktionsbeschreibung	54
4.3	Umsetzungsplattformen	60
4.4	Berechnungsgrundlage der bauteilspezifischen Ankunftszeit	61
4.4.1	Grundlogik des Stand-by-Managers	61
4.4.2	Ankunftszeitberechnung	63
4.5	Programmtechnische Umsetzung	65
4.5.1	Skalierungsmodell	66
4.5.2	Programmstruktur	67
4.6	Abschaltkonzepte auf Maschinenebene	69
4.6.1	Maschinenspezifische Abschaltstrategien	71
4.6.2	Hemmnisse Stand-by-Strategien	72
5	Modellbildung Fertigungssystem	73
5.1	Detaillierungsgrad	74
5.2	Verifizierung und Validierung der Modellkomponenten	74
5.3	Systembeschreibung	76
5.4	Modellierung des Transfersystems	80
5.4.1	Materialflusssteuerung	81
5.4.2	Teilebereitstellung und Teileentnahme	82
5.4.3	Förderstrecken und Wendestationen	85
5.4.4	Fördergut und Förderhilfsmittel	86
5.5	Modellierung der Maschinen	86
5.5.1	Methoden der energetischen Maschinenmodellierung	86
5.5.2	Betriebszustände der Maschine und deren Energieniveaus	89
5.5.3	Abschaltstrategien der Werkzeugmaschinen	91
5.6	Gesamtmodell des Fertigungssystems	92

5.6.1	Vereinfachungen des Gesamtmodells.....	93
6	Potenzialanalyse anhand von Szenarien	95
6.1	Basisszenarien.....	96
6.1.1	Energetische Ausgangsbasis.....	96
6.1.2	Szenario B0: Ausgangsbasis.....	97
6.1.3	Szenario B1: Variation der Abschaltstrategie.....	102
6.1.4	Ergebnisdarstellung Szenario B1.....	103
6.2	Erweiterungsszenarien.....	104
6.2.1	Szenario S1: Variation der Pausen.....	104
6.2.2	Szenario S2: Variation des Kundenbedarfs.....	110
6.2.3	Szenario S3: Maschinenverfügbarkeiten.....	111
7	Experimentelle Untersuchungen	115
7.1	Aufbau des Laborsystems.....	115
7.1.1	Basisautomation.....	119
7.1.2	Vernetzung der Teilsysteme.....	122
7.2	Implementierung und Systemtest des Stand-by-Managers.....	123
7.2.1	Konfiguration Stand-by-Manager.....	123
7.2.2	Integrationstest Stand-by-Manager.....	124
7.2.3	Systemtest Stand-by-Manager.....	125
7.3	Einsatz des Stand-by-Managers am Laborsystem.....	132
7.3.1	Versuchsparameter und Versuchsdurchführung.....	132
7.3.2	Versuchsergebnisse Betriebsphase.....	134
8	Zusammenfassung und Ausblick	143
	Abbildungsverzeichnis	XV
	Tabellenverzeichnis	XVIII
	Literaturverzeichnis	XIX
	Anhang	XXVII

Nomenklatur

Abkürzungen und Akronyme

Symbole	Beschreibung
KSS	Kühlschmierstoff
KW	Kühlwasser
PW	Prozesswärme
V&V	Verifikation und Validierung
DL	Druckluft
RT	Rohteil
PG	Prozessgas
BT	Bauteil
WZM	Werkzeugmaschine
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
MES	Manufacturing Execution System
ERP	Enterprise Resource Planning
SQL	Structured Query Language
RFID	Radio Frequency Identification
NS	Näherungssensor
TB	Teilebereitstellung
HB	Hauptband
Ident-System	Identifikationssystem
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
OPC	Open Platform Communications
Stand-by LV	Stand-by Level

Lateinische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
E	Energie	J
t	Zeit	s
\dot{Q}	Wärmestrom	W
P	Leistung	W
h	Spezifische Enthalpie	J/kg
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
z	Höhe über Bezugsniveau	m
\dot{H}	Enthalpie	J
W	Arbeit	J
p	Druck	Pa
V	Volumen	m ³
Z	Maschinenzustand	-
B	Toleranzband	-
G	Grenzfunktion	-
I	Gültigkeitsintervall	-
EB	Erwartungsbereich	-
v	Geschwindigkeit	m/s
l	Länge	m
AG	Auslastungsgrad	%
ZZ	Zykluszeit	s
KT	Kundentakt	s
AZ	Arbeitszeit	s
TB	Tagesbedarf	Stk

Griechische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
ω	Geschwindigkeit	m/s

Indizes

Symbol	Beschreibung
<i>ges</i>	Gesamt
<i>in</i>	Eingang
<i>out</i>	Ausgang
<i>zu</i>	Zugeführt
<i>ab</i>	Abgeführt
<i>DL</i>	Druckluft
<i>el</i>	Elektrisch
<i>xMax</i>	Maximalwertanalyse
<i>sig</i>	Signalfunktion
<i>min</i>	Minimal
<i>xStg</i>	Steigungsanalyse
<i>xΔStg</i>	Scheitelpunktanalyse
<i>xBer</i>	Bereichsanalyse
<i>o</i>	Obere Grenzfunktion
<i>u</i>	Untere Grenzfunktion
<i>W</i>	Streckenwartezeit
<i>Ankunft</i>	Ankunftszeit
<i>B</i>	Bearbeitungszeit
<i>s</i>	Streckenabschnittszeit
<i>UB</i>	Unterbrechungselement
<i>HB</i>	Hauptband
<i>MA</i>	Maschinen
<i>BR</i>	Bearbeitungszeit
<i>SR</i>	Störungs-/Rüstzeit

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Der Climate Change Report 2014 beschreibt die langfristigen Veränderungen des Weltklimas. Aus ihm geht hervor, dass die durch menschliche Aktivitäten hervorgerufenen Konzentrationsveränderungen von Kohlendioxid, Methan und Lachgas in der Atmosphäre zu einer erhöhten Energieaufnahme im Klimasystem führen und somit eine Veränderung des Weltklimas stattfindet (vgl. BMUB et al. 2014, S. 1). Der beschleunigte Klimawandel erhöht die Gefahr von negativen Auswirkungen auf die Ökosysteme, die Arten und Artenvielfalt sowie die Folgen für den Menschen (vgl. BMUB et al. 2014, S. 2). Trotz aktuell sinkender Einfuhrpreise für Rohöl, Steinkohle und Erdgas steht seit dem Jahr 2012 die Senkung von Treibhausgasemissionen zur Begrenzung der Erderwärmung im Fokus der weltweiten Politik und Wirtschaft (vgl. BMWi 2016). Im Dezember 2012 ist die Energy Efficiency Directive der europäischen Union in Kraft getreten, in der sich die Mitgliedstaaten auf eine 2%ige Senkung des Primärenergieverbrauchs bis 2020 verständigt haben (vgl. BMWi 2015). Zudem erfolgte 2015 die Festlegung auf ein verbindliches Ziel zur Begrenzung der Erderwärmung auf unter zwei Grad durch die Weltgemeinschaft auf der UN-Klimakonferenz in Paris (vgl. BMUB 2015). Schon 2010 definierte die deutsche Bundesregierung in ihrem Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 energie- und klimapolitische Ziele. Demnach soll der Ausstoß der Treibhausgasemissionen, bezogen auf das Jahr 1990 bis zum Jahr 2020, um 20% gesenkt werden. Bezogen auf das Jahr 2015 soll sogar eine 80%ige Reduzierung stattfinden (vgl. BMUB 2014, S. 9; BMWi 2012, S. 12). Um diese Ziele zu erreichen, sieht das Energiekonzept der Bundesregierung von September 2010 vor, den Anteil an erneuerbaren Energien gemessen am Bruttoendenergieverbrauch schrittweise bis 2050 auf mindestens 80% zu erhöhen (vgl. BMUB 2014, S. 9). Im Jahr 2014 lag der Endenergiebedarf der Bundesrepublik Deutschland bei ca. bei

8.649 PJ. Knapp 30 % davon benötigt der industrielle Sektor (vgl. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. 2015, S. 9). Eine energieintensive Branche des industriellen Umfelds ist die deutsche Automobilproduktion. Die Energiekosten lagen 2011 bei ca. 2,6 Milliarden Euro (vgl. BMWi 2013). In den Jahren 2008 bis 2010 mussten viele Unternehmen dieser Branche ihre Produktion aufgrund der Weltwirtschaftskrise drosseln. Energie stand in diesem Zeitraum als Kostenfaktor noch stärker im Fokus und es konnte vielfach beobachtet werden, dass der Energiebedarf nicht im Verhältnis zu den Produktionszahlen sank, sondern sich weit darüber befand (vgl. Max Felser, S. 2). Die Gründe sind meist ein verhältnismäßig hoher Grundlastenergiebedarf, welcher unabhängig von der Produktionslast bzw. den gefertigten Stückzahlen ist. Ein signifikanter Anteil entfällt dabei auf den Bereitschaftsbetrieb bzw. Stand-by-Betrieb von Produktionsanlagen (vgl. Wolff et al. 2013, S. 107) sowie auf die nötige Versorgungstechnik, wie z.B. Druckluftbereitstellung, Maschinenkühlung, Kühlschmierstoffversorgung, Raumklimatisierung und Beleuchtung.

Einen ähnlichen Effekt verursacht die zunehmende Erhöhung der Wandlungsfähigkeit und Flexibilisierung des Produktionsumfelds. Nachfrageorientierte Produktionsstrategien führen zu einer steigenden Mengenflexibilität sowie einer größeren Produktvielfalt im Produktionsumfeld, was zu Kapazitäts- und Auslastungsschwankungen der Produktion führt (vgl. Frithjof 2011, S. 212).

Der Produktentstehungsprozess hat in der Automobilproduktion einen wesentlichen Anteil an der gesamten Energie- und Ressourcenbilanz, sodass die Energieeffizienz in diesem Bereich von hoher und wachsender Bedeutung ist. Den Energiebedarf in der Produktion maßgeblich zu senken, ist heute ein wichtiges Unternehmensziel aller großen deutschen Automobilhersteller und deren Zulieferer. Ein wichtiger Schritt dafür ist die Verringerung des nicht wertschöpfenden Anteils durch einen optimalen Stand-by-Betrieb der Maschinen und Anlagentechnik (vgl. Schön 2013, S. 6; Daimler AG 2014, S. 56–59; Volkswagen Aktiengesellschaft 2014, S. 100–106).

1.2 Zielsetzung

Ein in der Automobilproduktion bekanntes und weitgehend ungelöstes Problem sind die bereits beschriebenen hohen Energie- und Medienbedarfe der Maschinen- und Anlagentechnik in nicht wertschöpfenden Zeiten. Produktionsunterbrechungen treten an Wochenenden, in geplanten Freischichten und Pausen auf. Zusätzlich entstehen auch ungewollt Unterbrechungen im regulären Produktionsablauf. In der Planungsphase eines Produktionssystems ist, aufgrund fehlender oder sich ändernder Informationen, eine optimale Auslegung des Fertigungssystems nur annäherungsweise zu erreichen. So kann es z.B. durch die Anpassungen der Bauteilgeometrie oder durch die Verwendung eines anderen Materials zu Takt- und Produktionszeitverschiebungen

kommen (vgl. Arnold und Furmans 2007, S. 112). Gerade in der Großserienfertigung von Bauteilen mit stark aufeinander abgestimmten Prozessschritten kann es aufgrund geringer Maschinenauslastung, bedingt durch Sicherheiten bei der Kapazitätenplanung, konjunkturbedingte Schwankungen der Produktionsmenge, Bottleneck-Anlagen, menschlichen Verhaltens, Bearbeitungszeitschwankungen sowie Pausen und unvorhersehbare Fehler zu Unterbrechungen im Produktionsfluss und somit zu ungewollten Maschinenstillständen kommen.

Warte- und Pausenzeiten lassen sich somit nicht gänzlich durch eine optimale Produktionsplanung- und steuerung vermeiden. Unterschiedliche Forschungsprojekte und Arbeitsgruppen haben sich der Thematik angenommen, die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen und Anlagentechnik durch optimierte Stand-by-Betriebsweisen und das Abschalten einzelner Maschinenkomponenten bei einer Unterbrechung im Produktionsprozess zu steigern. (vgl. Abele et al. 2011a, S. 66; Abele et al. 2013; Duflou et al. 2012; Wolff et al. 2013; Avram und Xirouchakis 2011; Diaz et al. 2011; Schöfberger et al. 2010; Zein 2012). Jedoch gehen die Ergebnisse über die möglichen Einsparpotenziale je nach Studie und Produktionsumfeld weit auseinander. Trotzdem wurde einheitlich gezeigt, dass meist ein signifikanter Anteil der benötigten Energie der Maschinen- und Anlagentechnik im Bereitschaftsbetrieb bzw. Warte- oder Teillastbetrieb anfällt. Verschiedene Studien zeigen, dass je nach Betriebsweise der Maschine zwischen 17 % und 47 % des elektrischen Jahresenergiebedarfs in unproduktiven, nicht wertschöpfenden Zeiten anfällt (Schröter et al. 2009; PROFIBUS Nutzerorganisation e. V. 2011; Lauen et al. 2010; Gutowski et al. 2005; Schöfberger et al. 2010; Müller et al. 2009; Wolff et al. 2013).

Die Arbeit soll dazu beitragen, den Energiebedarf einer vollautomatisierten Fertigung in produktionsfreien Zeiten durch gezieltes Abschalten und Drosseln von Maschinen, Anlagen oder deren Funktionsbaugruppen und Komponenten zu senken. Gerade oft und kurz auftretende Unterbrechungen im Produktionsablauf können aufgrund fehlender Informationen über deren zeitliches Eintreten und der zeitlichen Dauer nicht für einen Stand-by-Betrieb genutzt werden. Möglichkeiten, diese energetisch sinnvoll zu nutzen, sind aktuell nicht hinreichend erforscht. Ziel ist deshalb die Erforschung von Steuerungsalgorithmen, welche in einer vollvernetzten Komponenten-Großserienfertigung die Maschinen- und Anlagentechnik dazu befähigt, in nicht wertschöpfenden Zeiten einen energetisch optimalen Betriebszustand einzunehmen. Aufbauend darauf soll anhand einer Potenzialstudie untersucht werden, wie hoch die theoretischen und technisch umsetzbaren energetischen Einsparpotenziale sind. Abschließend soll die Frage geklärt werden, welchen ökologischen Vorteil intelligente Steuerungsalgorithmen im Vergleich zu konventionellen Stand-by-Strategien leisten können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Das erste Kapitel zeigt die Notwendigkeit der Industrie und Politik für die Ergreifung von Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Als Beitrag dazu ist Ziel dieser Arbeit, die Erforschung geeigneter Steuerungsalgorithmen zur Senkung des Energiebedarfs von Maschinen und Anlagen im industriellen Umfeld in unproduktiven Zeiten. Im zweiten Kapitel werden die theoretischen Grundlagen vermittelt und es erfolgt eine abschließende Darstellung des Stands der Technik und Wissenschaft. Aufbauend darauf wird im dritten Kapitel am Beispiel einer Bauteilfertigung eine umfangreiche Datenerhebung und Analyse durchgeführt. Zur Datenerhebung gehört die gesamte messtechnische Erfassung der Bauteilfertigung in unterschiedlichen Detailtiefen und mit unterschiedlichen Systemgrenzen. Der Energiebedarf wird bottom-up als auch top-down bestimmt. Aufbauend auf den Messdaten werden Methoden vorgestellt, wie aus Energiedaten zusätzliche Informationen abgeleitet werden können, wodurch abschließend das theoretische Einsparpotenzial eines idealen Stand-by-Betriebs bestimmt wird. Das Kapitel 4 beschreibt die Entwicklung eines Stand-by-Managers, mit welchem Maschinen eines Fertigungssystems dazu befähigt werden, in unproduktiven Zeiten einen energetisch günstigen Zustand einzunehmen. Dazu werden die in der Konzeptentwicklung definierten Teilfunktionen und das der Entwicklung zugrundeliegende Fertigungsumfeld beschrieben. Anschließend folgen die Beschreibung der Berechnungsgrundlage und die programmtechnische Umsetzung des Stand-by-Managers sowie die Darstellung einer möglichen Integration auf Maschinenebene mit zugehörigen Abschaltstrategien. Für die Durchführung der Potenzialstudie erläutert das Kapitel 5 die verschiedenen Schritte der Modellbildung. Angefangen über eine Eingrenzung des Detaillierungsgrades und der Beschreibung der verwendeten Verifizierungs- und Validierungsmethoden sowie einer ausführlichen Systembeschreibung, werden der Aufbau und die Funktion der einzelnen Teilmodelle beschrieben, welche durch eine anschließende Vernetzung das Gesamtsystem ergeben. Das Kapitel 6 definiert die Untersuchungsschwerpunkte der Potenzialanalyse. Der Fokus liegt auf dem Vergleich verschiedener Stand-by-Strategien des Fertigungssystems sowie der Quantifizierung der möglichen energetischen Einsparpotenziale durch den Einsatz des Stand-by-Managers. Nach der Quantifizierung der möglichen Einsparpotenziale folgt eine Testphase des Stand-by-Managers an einem Laborsystem. In Kapitel 7 wird dafür der mechanische und steuerungstechnische Aufbau beschrieben. Daran anschließend folgt ein Integrations- und Systemtest, welchem nachgelagert ein Langzeitversuch folgt, in dem die realen Steuerungsmechanismen und Einsparungen messtechnisch ermittelt werden. Abschließend folgt in Kapitel 8 ein Fazit mit Ausblick.

Kapitel 2

Grundlagen der Arbeit

Der Fokus des Kapitels liegt auf der Darstellung von Möglichkeiten zur Senkung des Energie- und Ressourcenbedarfs in nicht wertschöpfenden Zeiten (künftig unproduktive Zeiten, Pausen oder Unterbrechungen genannt). Dazu erfolgt die Erläuterung der Kernprozesse einer Baugruppenfertigung in der Automobilindustrie. Ausgehend davon wird die Material- und Transportlogistik erläutert und die technischen Möglichkeiten der vernetzten Produktion dargestellt. Abschließend zeigt der Stand der Technik und Wissenschaft etablierte und erforschte Stand-by-Konzepte zur Senkung des Energiebedarfs einer Großserienfertigung.

2.1 Fertigungsprozesse in der mechanischen Bearbeitung

Die in dieser Arbeit zugrundeliegenden Untersuchungen beziehen sich auf Baugruppen und deren Herstellungsprozesse, die in der Automobilindustrie dem Antriebsstrang zugeordnet werden. Die Systemgrenze des Untersuchungsgegenstands ist so gewählt, dass nur Prozesse und Maschinen betrachtet werden, die unmittelbar an der Herstellung der Baugruppe beteiligt sind. Dazu zählen die notwendigen Fertigungs- und Montageprozesse.

Der Fokus der Arbeit liegt auf dem Bereich einer mechanischen Fertigung. Ur- und umformende vorgelagerte Prozesse, wie beispielsweise das Gießen von Gehäusen oder das Schmieden von Zahnradrohlingen, sind nicht Bestandteil dieser Arbeit.

2.1.1 Werkzeugmaschinen

Die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen rückt aktuell immer stärker in den Fokus der Kunden und Betreiber. Zunehmend erfolgen Lebenszykluskosten-Berechnungen als Entscheidungsgrundlage für den Kauf von Werkzeugmaschinen (vgl. Lauven et al. 2010, S. 14). Eine beispielhafte Kostenaufteilung eines Bearbeitungszentrums im Zweischichtbetrieb produzierend zeigt Abbildung 2.1 (vgl. Dervisopoulos 2005, S. 27). Die Energie- und Druckluftkosten betragen dabei 21 % der Gesamtbetriebskosten.

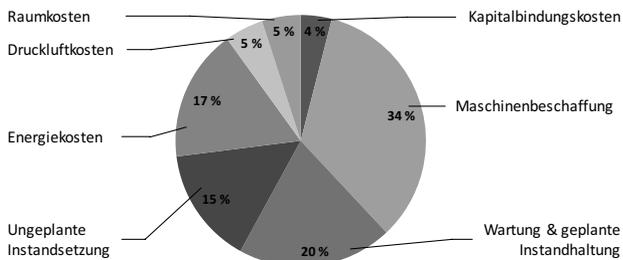


Abbildung 2.1: Lebenszykluskosten einer Werkzeugmaschine (vgl. Dervisopoulos 2005, S. 26)

Trotz der hohen Energiekosten stehen nach wie vor die Anforderungen an die Verfügbarkeit, Qualität und Mengenleistung im Fokus der Maschinenbetreiber (vgl. Neugebauer 2012, S. 10).

Die Klassifizierung von Werkzeugmaschinen erfolgt meist hinsichtlich des verwendeten Fertigungsverfahrens und des Grades der Automatisierung (vgl. Neugebauer 2012, S. 15). Die für diese Arbeit relevanten Fertigungsverfahren einer Getriebefertigung sind trennende (Spanen, Abtragen und Zerteilen) und umformende Prozesse (Umformen & Zerteilen). Dazu zählen Drehmaschinen, Fräsmaschinen, Schleifmaschinen, Bohrmaschinen, Honmaschinen, Räummaschinen, Axialumformmaschinen und Walzmaschinen. Ziel der spanenden und umformenden Formgebung ist es, durch den mechanischen Abtrag bzw. durch die Umformung von Material die geometrischen Eigenschaften des Werkstücks zu bestimmen (vgl. Neugebauer 2012, S. 29; Hirsch 2012, S. 11; Hertz et al. 2013, S. 9). Der Funktionsumfang von Werkzeugmaschinen ist deshalb vielfältig und kann je nach Kundenanforderung spezifisch angepasst werden. Um den Entwicklungsaufwand zu begrenzen, erfolgt deshalb meist ein modularer Aufbau der Werkzeugmaschine in einzelnen Baugruppen (vgl. Hirsch 2012, S. 83).

2.1.1.1 Energetisch relevante Komponenten von Werkzeugmaschinen

Die energetisch relevanten Baugruppen sind im Wesentlichen die in der Maschine verbauten Antriebe. Diese können für spanende Fertigungsverfahren in Hauptantriebe, Nebenantriebe und Hilfsantriebe unterteilt werden (vgl. Hirsch 2012, S. 137). Die Hauptantriebe ermöglichen die Spanabnahme durch die Erzeugung der Schnittbewegung. Die Nebenantriebe sind verantwortlich für die Vorschubbewegung des Bauteils oder des Werkzeugs. Nicht direkt am formgebenden Prozess beteiligt sind die Hilfsantriebe, welche beispielsweise den Werkzeugwechsel ermöglichen, die Kühlmittelpumpe und das Hydraulikaggregat antreiben oder den Maschineninnenraum absaugen (vgl. Hirsch 2012, S. 137). Abele (2013) und Kuhrke (2011, S. 64–66) unterteilen die Nutzungsprofile der einzelnen Baugruppen in stationäre und instationäre Zustände (vgl. Abbildung 2.2). Einen konstanten Leistungsbedarf, unabhängig vom Betriebszustand der Maschine, haben meist Nebenaggregate bzw. Hilfsantriebe mit einer festen Drehzahl. Dazu zählen z.B. Absaugeinrichtungen, Spänefördersysteme sowie Kühl- und Schmierstoffeinrichtungen. Diese vom Fertigungsprozess entkoppelten Baugruppen sind verantwortlich für die Grundlast der Werkzeugmaschine und stellen in unproduktiven Phasen die energetischen Hauptverbraucher dar (vgl. Bittencourt 2013, S. 12).

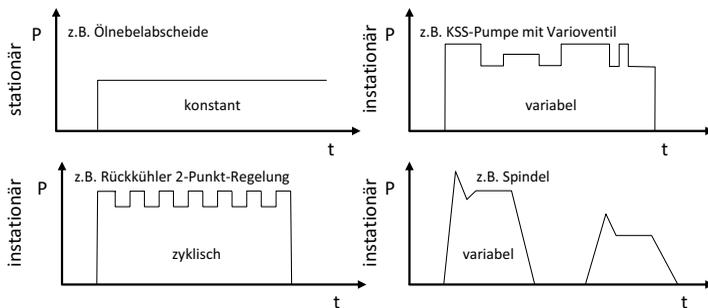


Abbildung 2.2: Qualitative Zustandsbeschreibung der Bedarfsgruppen (in Anlehnung an Kuhrke 2011, S. 64)

Ändert sich die Leistungsaufnahme einer Baugruppe innerhalb eines Betriebszustands, handelt es sich um einen instationären Zustand. Die Leistungsänderung kann zyklisch erfolgen, z.B. durch die Hysterese eines 2-Punkt-Reglers oder variabel, z.B. durch die Veränderung der Druckstufe einer KSS-Pumpe oder der Drehzahl der Antriebsspinden (vgl. Kuhrke 2011, S. 64). Energetisch relevante Baugruppen sind meist die Haupt- und Nebenantriebe, die Kühlschmierstoffversorgung, die Hydraulikbaugruppe und die Maschinenkühlung. Abbildung 2.3 zeigt eine beispielhafte

prozentuale Verteilung der Energiekosten für ein Bearbeitungszentrum. Es wird ersichtlich, dass ca. 50 % der Gesamtkosten für die Kühlschmierstoffbereitstellung notwendig sind. Weitere 18 % entfallen auf die Maschinenkühlung sowie 7 % auf die Hydraulik. Die Hilfsantriebe verursachen somit ca. 75 % der Gesamtenergiekosten, wohingegen der Antriebsstrang, bestehend aus den Haupt- und Nebenantrieben, mit ca. 10 % nur einen geringen Anteil einnimmt.

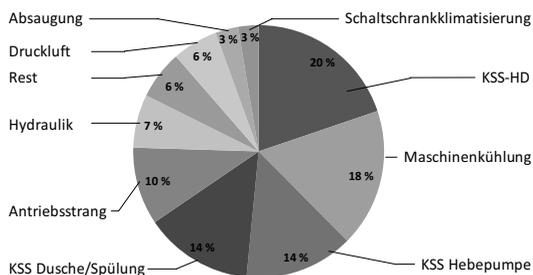


Abbildung 2.3: Prozentuale Energiekostenverteilung einer Werkzeugmaschine (vgl. Abele et al. 2011a, S. 66)

Hauptantrieb/Hauptspindel

Die vom Hauptantrieb letzte angetriebene Welle wird als Hauptspindel bezeichnet. Diese ist in unmittelbarer Nähe des spannenden Prozesses (vgl. Neugebauer 2012, S. 291; VGL: Perovic 2006, S. 684). Je nach Größe der Werkzeugmaschine kann die Antriebsleistung des Hauptantriebs bis zu 120 kW betragen (vgl. Bittencourt 2013, S. 10).

Nebenantriebe

Bei den Nebenantrieben handelt es sich überwiegend um Vorschubantriebe, welche die Vorschubkraft und Vorschubbewegung des Werkzeugs oder Werkstücks erzeugen (vgl. Perovic 2006, S. 658). Häufig erfolgt der Antrieb der Vorschubantriebe durch asynchrone Drehstrommotoren mit mechanischen Getrieben, Hydraulikzylindern, Hydromotoren, Servomotoren, Linearmotoren oder Schrittmotoren (vgl. Perovic 2006, S. 658).

Hydraulikaggregat

Das in einer Werkzeugmaschine verbaute Hydraulikaggregat erzeugt durch die Wandlung mechanischer Leistung (meist angetrieben durch einen Elektromotor) in hydraulische Leistung einen Fluidvolumenstrom mit einem zugehörigen Druck (vgl. Will und Gebhardt 2011, S. 7). Die Leistungsdichte, bezogen auf den Bauraum, ist bei hydraulischen Systemen im Vergleich zu elektrischen Systemen wesentlich größer, weshalb sie häufig für das Spannen von Werkzeugen

oder Vorschubbewegungen eingesetzt werden (vgl. Bittencourt 2013, S. 12; Will und Gebhardt 2011, S. 4). Zudem erfolgt der Einsatz von Hydraulik für Brems- und Lösevorgänge der hydrostatischen Lagerung von Vorschubachsen und dem Gewichtsausgleich bei Vertikalachsen (Kuhrke 2011, S. 37). Aus Kostengründen wird das Hydraulikaggregat meist mit einer Konstantpumpe betrieben, welche teilweise über 2- oder 3-Wege-Strom-Regel-Ventile einen in Grenzen veränderlichen Volumenstrom bereitstellt (vgl. Will und Gebhardt 2011, S. 173; Bittencourt 2013, S. 13).

Kühlschmierstoffsysteme

Die Aufgabe der Kühlschmierstoffsysteme ist es, die während des Zerspanungsprozesses entstehende Wärme abzuführen, die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück zu verringern und den entstehenden Materialabtrag abzutransportieren (vgl. Perovic 2006, S. 353). Je nach Einsatzgebiet des Kühlschmierstoffs wird häufig in Hoch- und Niederdruckenwendungen unterschieden. Zu den Niederdruckenwendungen zählen die Überflutung des Werkstücks mit Kühlschmierstoff, das Rückfördern und Filtern des Kühlschmierstoffs aus dem Maschinenraum oder auch die Homogenisierung der Maschinentemperatur, z.B. durch die Spülung des Maschinenbettes mit Kühlschmierstoff (vgl. Kuhrke 2011, S. 38). Besitzt ein Werkzeug eine interne Kühlmittelzufuhr, so wird durch die Hauptspindel das Kühlmittel unter hohem Druck bereitgestellt. Die Kühlmittelzufuhr zum Abtransport der Wärme und Späne erfolgt dabei häufig mit einem Druck zwischen 50 bar und 70 bar. Die Kühlmittelpumpe wird analog zum Hydraulikaggregat meist mit einem konstant betriebenen Motor angetrieben (vgl. Kuhrke 2011, S. 38).

Maschinenkühlung

Der überwiegende Anteil der einer Werkzeugmaschine zugeführten elektrischen Energie wird während des Bearbeitungsprozesses in Wärme umgewandelt. Die entstehende Wärme, z.B. im Hydraulik- oder Kühlschmierstoffsystem, wird mithilfe eines Wärmeübertragers in das maschineninterne Kühlsystem abgegeben. Die Kühlflüssigkeit, welche die Wärme aufnimmt, wird dabei in einem separaten Kreislauf befördert, an welchem alle erforderlichen Komponenten angeschlossen sind. Die Wärmeabfuhr aus dem internen Maschinenkühlkreis erfolgt über die Ankopplung an externe Wärmesenken. Dies sind typischerweise Kompressionskältemaschinen in unmittelbarer Nähe der Werkzeugmaschinen oder zentralgekühlte Wärmeübertrager.

Weitere Nebenaggregate

Je nach Werkzeugmaschine können weitere Nebenaggregate energetisch relevant sein. Eine Übersicht verbauter Nebenaggregate ist in Tabelle 2.1 dargestellt

Tabelle 2.1: Übersicht möglicher Nebenaggregate von WZM (in Anlehnung an Kührke 2011, S. 14)

Lüftung	Beleuchtung	Wegmesssysteme
Zentralschmierung	Display	Luftkompressoren
Werkzeugwechsler	Steuerung	Späneförderer
Werkstückwechsler	Absaugung	Spänezentrifugen
Automatisierte Messeinrichtungen	Ver- und Entsorgungseinrichtungen	Kühlschmierstoffreinigungssysteme
Spindelschmierung	Bauteiltrocknungssysteme	Abriechspindeln

2.1.1.2 Energie- und Stoffstromanalyse von Werkzeugmaschinen

Um eine Werkzeugmaschine betreiben zu können, sind neben der elektrischen Leistung, in Abhängigkeit des Fertigungsprozesses und dem Aufbau der Maschine, noch weitere Prozessmittel erforderlich (vgl. Abele et al. 2011b, S. 281; Heidenhain 2010, S. 2). Zudem erfolgt eine zyklische Versorgung der Maschine mit Bauteilen (BT). Zu den wichtigsten Prozessmedien einer Maschine gehören Druckluft (DL), Kühlwasser, Kühlschmierstoff (KSS), Prozessgase (PG) und Prozesswärme (PW). Dabei kann unterschieden werden, ob die Maschine zentral oder dezentral mit den Prozessmitteln versorgt wird (vgl. Abbildung 2.4). Bei einer zentralen Versorgung wird die Maschine meist über ein Ringleitungsnetz mit Kühlschmierstoff, Kühlwasser und Druckluft beliefert. Erfolgt eine dezentrale Bereitstellung der Prozessmittel, so verfügt die Maschine intern oder maschinennah über Versorgungs- und Aufbereitungsaggregate. Für die Maschinenkühlung wird meist eine Kompressionskältemaschine eingesetzt, welche die entstehende Wärme in die Halle abführt. Die Kühlschmierstoffaufbereitung erfolgt meist maschinenintern über eine entsprechende Filtertechnik. Abbildung 2.4 zeigt die Stoffströme einer zentral und dezentral versorgten Werkzeugmaschine.

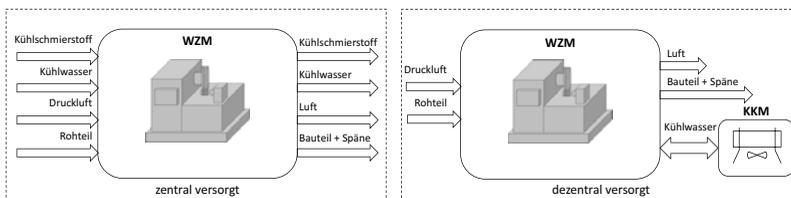


Abbildung 2.4: Stoffströme einer Werkzeugmaschine

Im Allgemeinen ist die Summe der Massenströme der eintretenden und austretenden Stoffströme identisch. Dies gilt sowohl für zentral als auch dezentral versorgte Maschinen. Unter Vernachlässigung des abgetragenen Spanvolumens ergibt sich die Massenbilanz zu:

$$\frac{dm_{ges}}{dt} = \dot{m}_{KSSin} + \dot{m}_{KWIn} + \dot{m}_{DLIn} + \dot{m}_{BT} - \dot{m}_{KSSout} - \dot{m}_{KWout} - \dot{m}_{DLOut} + \dot{m}_{BT} = 0 \quad (2.1)$$

Der Energiebedarf zur Herstellung eines Bauteils ist nicht ausschließlich durch den Energiebedarf der Werkzeugmaschine bestimmt, sondern auch durch den Teil der aufgewendeten Energie zur Bereitstellung der Prozessmedien. Für die energetische Bilanzierung ist es deshalb erforderlich, zwischen zentral und dezentral versorgten Maschinen zu unterscheiden.

Die gesamte elektrische Arbeit einer Werkzeugmaschine wird in der Regel entlang des Bearbeitungsprozesses in Wärme umgewandelt. Dies kann direkt erfolgen, z.B. bei der elektrischen Beheizung von Komponenten oder indirekt über die Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische Energie und Umformarbeit, bzw. Zerspanungsenergie. Der Energietransport und die Energiewandlung, die in einer Werkzeugmaschine stattfindet, kann anhand des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik für offene Systeme beschrieben werden.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + P + \sum_{zu} \dot{m}_{zu} \left(h_{zu} + \frac{\omega_{zu}^2}{2} + g z_{zu} \right) - \sum_{ab} \dot{m}_{ab} \left(h_{ab} + \frac{\omega_{ab}^2}{2} + g z_{ab} \right) \quad (2.2)$$

Für eine zentral versorgte Maschine, welche eine stationäre Temperatur besitzt, sich also nicht in einer Aufheiz- oder Abkühlphase befindet, kann unter Vernachlässigung der Energieübertragung aufgrund von Höhendifferenzen und bewegten Massen die Energiebilanz vereinfacht werden. Zudem gilt die in Formel (2.1) beschriebene Bedingung der Massenstrombilanz.

$$\dot{Q} + P = - \sum_{zu} \dot{m}_{zu} \cdot h_{zu} + \sum_{ab} \dot{m}_{ab} \cdot h_{ab} \quad (2.3)$$

Die Summe der zu- und abgeführten Enthalpieströme bestimmt sich aus den einzelnen Enthalpieströmen des Kühlschmierstoffs, des Kühlwassers und des Bauteiles.

$$\sum_{zu} \dot{m}_{zu} \cdot h_{zu} = \dot{H}_{KSSin} + \dot{H}_{KWIn} + \dot{H}_{BT} \quad (2.4)$$

$$\sum_{ab} \dot{m}_{ab} \cdot h_{ab} = \dot{H}_{KSSout} + \dot{H}_{KWout} + \dot{H}_{BT} \quad (2.5)$$

Unter Vernachlässigung des Kühleffekts durch die Expansion der Druckluft wird die in ihr enthaltene Energie erst in mechanische Energie für den Bearbeitungsprozess gewandelt und anschließend durch Reibung in Wärme umgeformt.

$$W_{DL} = - \int p \cdot dV = Q_{DL} \quad (2.6)$$

Unter der Annahme, dass keine Rückspeisung von elektrischer Energie stattfindet und keine Energie z.B. hydraulisch, pneumatisch, strukturell oder kapazitiv zwischengespeichert wird, erfolgt die komplette Umwandlung der elektrischen Leistung in einen Wärmestrom.

$$P_{el} = \dot{Q}_{el} \quad (2.7)$$

Die durch die Zufuhr elektrischer Energie entstehende Wärme verteilt sich während des Bearbeitungsprozesses in der Maschine. Ein Teil der Wärme gelangt in das Kühlwasser und den Kühlschmierstoff, ein weiterer Teil wird von den Komponenten und Strukturelementen der Maschine sowie dem Bauteil aufgenommen. Bei einer konstanten Maschinentemperatur wird der Teil der entstehenden Wärme, welcher nicht mithilfe eines Stoffstroms aus der Maschine abgeführt wird, über Konvektion und Strahlung an die Umgebung abgegeben.

2.1.2 Produktionsleitsysteme

Die Ziele von Produktionsleitsystemen sind es, Kosten, Qualität und Liefertreue bei steigender Komplexität der Produkte sowie einer erhöhten Variantenvielfalt auf einem gleichbleibenden hohen Niveau zu halten (Kropik 2009, S. 9; Dombrowski und Mielke 2015, S. 1). Deren Integration erfolgt in der Fertigungsleitebene und in der Prozessführungsebene. Den Aufbau der hierarchischen Ebenenstruktur eines Unternehmens zeigt Abbildung 2.5.

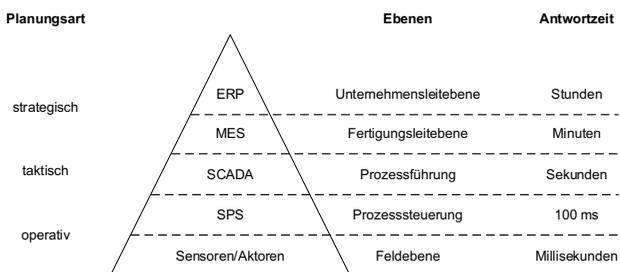


Abbildung 2.5: Die Automatisierungspyramide (in Anlehnung an Kropik 2009, S. 61; Sauter 2007, S. 18)

Produktionsleitsysteme übernehmen Steuerungs- und Planungsaufgaben. Auf taktischer Ebene erfolgt meist die Produktionssteuerung. Diese soll gewährleisten, dass die Fertigungsabläufe wie geplant stattfinden. Auftretende Abweichungen zum geplanten Zustand werden zudem an das Planungssystem gemeldet (vgl. Kropik 2009, S. 62).

Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)

Als SCADA-Systeme werden Leitsysteme bezeichnet, welche für die Prozessführung eingesetzt werden. Diese steuern, regeln und überwachen die angebundene Maschinen- und Anlagentechnik. Aufgrund der Nähe zur Prozesssteuerungsebene besitzen diese Systeme kurze Antwortzeiten und ermöglichen mithilfe einer Mensch-Maschinen-Schnittstelle (HMI) das Eingreifen in den Automatisierungsprozess (vgl. Radvanovsky und Brodski 2013, S. 32).

Manufacturing Execution System (MES)

Ein MES-System ist der Fertigungsleitebene zugeordnet und übernimmt nach der VDI- Richtlinie 5600 die Aufgaben der Fertigungsfeinplanung und -steuerung, des Informations-, Qualitäts-, Personal-, Material-, Auftrags-, Energie- und Betriebsmittelmanagements sowie Aufgaben der Datenerfassung und Leistungsanalyse (vgl. VDI 5600, S. 5). Aufgrund des Ausbaus des Industrial Ethernet und der daraus resultierenden vereinfachten Kommunikation vertikal durch alle Ebenen wird eine klare Abgrenzung und Zuordnung der Systeme zu Unternehmensebenen zunehmend schwierig. Durch verbesserte Schnittstellentechnologie übernehmen heutige ERP-Systeme Teilaufgaben der MES-Systeme, welche hingegen klassische SCADA-Systeme ablösen (vgl. Sauter 2007, S. 16; Kropik 2009, S. 63).

2.1.2.1 Datenbanksysteme

Datenbanksysteme haben die Aufgabe, große Datenmengen zu speichern und zu verwalten (vgl. Brause 2005, S. 143). Ein Datenbanksystem besteht aus einem Datenkatalog, welcher die Metadaten des Datenbanksystems enthält, einer Datenbasis bestehend aus einzelnen Datenbanken sowie einem Datenbankmanagementsystem, welches die in Beziehung stehenden Daten zentral verwaltet (vgl. Burnus 2008, S. 8; Brause 2005, S. 149). Der logische Aufbau des Datenbanksystems ist durch die Datenbankmodelle beschrieben. Diese legen fest, wie die Speicherung der Daten der einzelnen Datenbanken erfolgt. Derzeit sind relationale Datenbankmodelle am gebräuchlichsten. Dabei erfolgt die Speicherung der Daten ausschließlich in Tabellen, welche über Beziehungen untereinander verknüpft sind (vgl. Schicker 2014, S. 12). Durch die Einführung des Industrial Ethernet, der zunehmenden Vernetzung im industriellen Umfeld sowie Anwendungen aus dem Bereich der Industrie 4.0, entstehen aktuell sehr große Datenmengen. Das effiziente Verwalten dieser überwiegend in relationalen Datenbanken gespeicherten Daten stellt eine Herausforderung dar. Moderne Entwicklungen sind deshalb meist keine reinen relationalen Datenbanken und werden unter dem Begriff NoSQL zusammengefasst. Diese reagieren teilweise unempfindlicher auf Inkonsistenzen, was eine effizientere Bearbeitung der Abfragen zulässt (vgl. Schicker 2014, S. 14).

2.2 Materialflusssysteme der Automobilindustrie

Eine Baugruppenfertigung kann grob in Fertigungs- und Montageprozesse unterteilt werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung von Fertigungsprozessen. Der vorgelagerte externe Materialfluss, welcher beispielsweise die Anlieferung von Kaufteilen beschreibt, ist nicht Teil der Arbeit. Die Darstellung beschränkt sich auf den internen Materialfluss, welcher die Produktionsabläufe zwischen dem Wareneingang und dem Warenausgang erläutert (vgl. Grundig 2012, S. 116).

In einer heutigen Serienproduktion in der Automobilindustrie sind Werkzeugmaschinen überwiegend durch Transferstraßen miteinander gekoppelt und stellen als Ganzes ein Fertigungssystem dar (vgl. Neugebauer 2012, S. 17). Die Versorgung der Fertigungsprozesse mit Bauteilen erfolgt durch die Verknüpfung aller im Fertigungssystem enthaltenen technischen Abläufe (VDI-Richtlinie 3300). Eine Übersicht, wie der interne Materialfluss einer Bauteilfertigung organisiert sein kann, zeigt Abbildung 2.6.

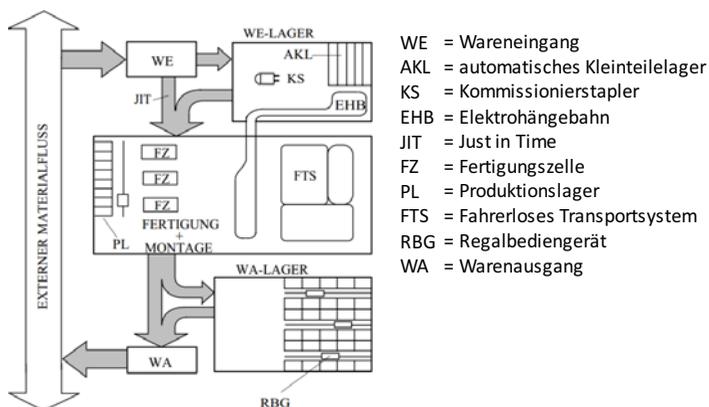


Abbildung 2.6: Betriebsinterner Materialfluss einer Bauteilfertigung (vgl. Arnold und Furmans 2007, S. 5)

Der interne Materialfluss ist gekennzeichnet durch eine Vielzahl unterschiedlicher Transport- und Verteilprozesse. Dies gilt sowohl für den Transport zwischen den einzelnen Fertigungsbereichen als auch in den Fertigungsbereichen selbst. Die einzelnen Fertigungszellen aus Abbildung 2.6 können Einzelmaschinen oder auch Fertigungslinien bzw. Fertigungssysteme darstellen. Die Ablauforganisation des Materialflusses in diesen Fertigungszellen wird je nach Fertigungsform unterschieden.

2.2.1 Ablaufarten der Teilefertigung

Die Herstellung von Bauteilen kann mithilfe verschiedener Ablaufarten erfolgen. Abbildung 2.7 zeigt eine Übersicht der gängigsten Fertigungsarten.

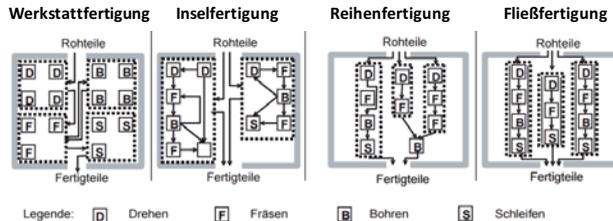


Abbildung 2.7: Ablaufart der Teilefertigung (vgl. Schenk et al. 2014, S. 371)

Die Werkstattfertigung findet überwiegend für die Teilefertigung kleiner Serien Anwendung. Dazu sind die Fertigungsmittel räumlich eng beieinander und der Materialfluss zwischen den einzelnen Fertigungsmitteln ist ungerichtet. Die Werkstattfertigung ist sehr flexibel im Teilespektrum, was jedoch meist mit geringen Maschinenauslastungen verbunden ist. Die Bearbeitung der Bauteile erfolgt in Warteschlangen, häufig existiert ein Engpassprozess (vgl. Schenk et al. 2014, S. 371).

Die Inselfertigung fasst Fertigungsmittel zur Herstellung von Teilegruppen räumlich zusammen. Dies führt zu einem variablen und geringen Materialfluss innerhalb dieser Gruppen (vgl. Grundig 2012, S. 136; Schenk et al. 2014, S. 371).

Die Reihenfertigung besitzt einen gerichteten Materialfluss, welcher die Arbeitsfolge der Teilegruppe widerspiegelt. Dennoch ist der Materialfluss dahingehend flexibel, dass einzelne Fertigungsmittel übersprungen werden können. Die Reihenfertigung besitzt keinen zeitlichen Zwang, jedoch erfolgt eine enge zeitliche und kapazitive Abstimmung der Fertigungsmittel. Zum Einsatz kommt diese Fertigungsform bei Großserien-, Sorten-, und Massenprodukten (vgl. Grundig 2012, S. 136; Schenk et al. 2014, S. 371).

Bei der Fließfertigung erfolgt eine Verkettung der einzelnen Fertigungsmittel untereinander. Diese kann lose oder starr ausgeführt werden. Bei einem starr verketteten Fertigungssystem erfolgt der Teiletransport synchron. Der langsamste Prozess bestimmt den Takt des Fertigungssystems. Durch die Abstimmung der einzelnen Bearbeitungszeiten entsteht ein gleichmäßiger, kontinuierlicher Materialfluss, wobei sich Unterbrechungen und Störungen in der Regel auf alle Fertigungsmittel auswirken (vgl. Grundig 2012, S. 127; vgl. Arnold und Furmans 2007, S. 14). Bei einem lose verketteten Fertigungssystem sind die Transportmechanismen voneinander entkoppelt. Der

Materialfluss erfolgt asynchron und es existiert keine zeitliche Bindung zwischen den Fertigungsmitteln (vgl. Grundig 2012, S. 138). Dieses Fertigungsverfahren kommt für Produkte zum Einsatz, welche in großen Stückzahlen für einen langen Zeitraum produziert werden, wie bspw. Montageanlagen (vgl. Schenk et al. 2014, S. 371).

2.2.2 Produktionssteuerung/Fertigungssteuerung

Die Produktionssteuerung dient der Umsetzung des in der Produktionsplanung festgelegten Produktionsprogramms. Dazu enthält sie alle Maßnahmen, die zum Erreichen des vorgegebenen Produktionsziels notwendig sind. Abweichungen vom Planungszustand, z.B. durch Störungen, werden durch die Produktionssteuerung ausgeglichen (vgl. Schneider et al. 2005, S. 14; Lödding 2008, S. 6). Die Fertigungssteuerung ist integraler Bestandteil der Produktionsplanung und -steuerung und regelt den Zeitpunkt und die Reihenfolge der Arbeitsaufträge für die Fertigung. Zudem übernimmt sie die Kapazitätensteuerung der Maschinen und Mitarbeiter (vgl. Lödding 2008, S. 7).

Die Herstellung individueller Produkte erfolgt meist nach einem bestandsorientierten Steuerungsverfahren. Durch den Eingang eines Kundenauftrags wird die Beschaffung und Produktion ausgelöst. Es kann zwischen der Auftragsproduktion (Make-to-order) und der Lagerproduktion (Make-to-stock) unterschieden werden (vgl. Dickmann 2007, S. 7). Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Produktionsarten besteht darin, dass bei der Lagerproduktion aufgrund von eingelagerten Produkten der Kundenauftrag sofort beliefert werden kann, wohingegen bei der Auftragsproduktion das Produkt vor der Auslieferung noch produziert werden muss (vgl. Dickmann 2007, S. 7). Bestandsorientierte Steuerungsverfahren erzeugen beim Erreichen oder Unterschreiten eines vorgegebenen Sollbestands einen Auftrag zur Bestandsanpassung (vgl. Lödding 2008, S. 147; Dickmann 2007, S. 118). Die Anpassung der Bestände kann anhand verschiedener Kriterien erfolgen. Häufig eingesetzte Verfahren sind das Mindestbestands- und Bestellrhythmusverfahren sowie das Bestellbestandsverfahren und die Ampel- und Kanbansteuerung (vgl. Dickmann 2007, S. 118; Lödding 2008, S. 148–155).

Materialflussteuerung Local Control

Das Local Control Konzept dient dazu, den Materialfluss einer ungetakteten, mehrstufigen Fließproduktion zu steuern (vgl. Rucker 2006, S. 25). Das Steuerungskonzept basiert auf einer Materialflussteuerung mittels Tag, bei welcher der Tag grundsätzlich auf dem Produkt mitgeführt wird und die Steuerungsinformationen enthält (vgl. Schneider et al. 2005, S. 130). Die Maschinen werden anhand der Tag-Informationen mit Bauteilen versorgt und produzieren, wenn Teile

vorhanden sind, die benötigten Maschinen und Arbeitskraft zur Verfügung stehen und der maximale Lagerbestand noch nicht erreicht ist (vgl. Schneider et al. 2005, S. 147).

2.3 Stand-by-Strategien im industriellen Umfeld

Über Projekte mit dem Ziel der Reduktion des Energiebedarfs in produktionsfreien Zeiten wird derzeit in verschiedenen Fachzeitschriften und Publikationen berichtet. Schwerpunkt dieser Projekte sind die effizientere Gestaltung der Maschinen- und Anlagenkomponenten sowie die Optimierung der Steuerungs- und Regelungslogik. Weiter beschäftigen sich einige Projekte mit dem Einsatz einer zentralen Leittechnik zur energieeffizienten Produktionssteuerung sowie der Modellierung und Simulation von Material- und Energiefluss zur Bewertung von Abschaltstrategien. Zur Einordnung und Abgrenzung der Arbeit erfolgt die Darstellung bereits bestehender Systeme.

Aktuelle Werkzeugmaschinen sind heute meist technisch in der Lage, in unproduktiven Zeiten einen energetisch günstigen Betriebszustand einzunehmen. Diese Funktionalitäten sind jedoch im Beschaffungsprozess zu berücksichtigen und meist mit erhöhten Investitionskosten für Maschinenkomponenten und Steuerungstechnik verbunden. Zusätzliche Kosten werden durch Studien zur Risikobewertung von Stand-by-Strategien verursacht (vgl. Weinert und Mose 2014, S. 91). Eigene Untersuchungen und verschiedene Studien zeigen, dass die technisch möglichen energetischen Einsparpotenziale durch einen optimierten Stand-by-Betrieb kaum ausgeschöpft werden (vgl. Wolff et al. 2013, S. 1; Frithjof 2011, 2011, S. 36; PROFIBUS Nutzerorganisation e. V. 2011, S. 11). Die Hauptgründe dafür sind überwiegend Ängste vor eventuell auftretenden Qualitätsschwankungen, Probleme beim Wiederanlauf, eine Verkürzung der Lebensdauer der Maschinenkomponenten und die Verringerung der produzierten Mengen durch verlängerte Anlauf- oder Warmlaufzeiten nach einer Pause (vgl. Schöfberger et al. 2010, S. 10; Frithjof 2011, S. 36; Wolff et al. 2013, S. 168).

Die in einer Großserienfertigung eingesetzten Werkzeugmaschinen werden im Regelfall automatisch mit Bauteilen versorgt und arbeiten völlig eigenständig. Der Eingriff eines Mitarbeiters in den Produktionsablauf erfolgt nur, wenn Rüstvorgänge, Störungen und evtl. nötige Prozesskorrekturen erforderlich sind. Zudem besitzen die Werkzeugmaschinen sehr geringe Ausfallwahrscheinlichkeiten und Ausschussquoten. Die Hersteller konzipieren die Maschinen für einen Dauerbetrieb, weshalb ein energieeffizienter Maschinenzustand in unproduktiven Phasen eine untergeordnete Relevanz bei der Entwicklung besitzt.

Die sich derzeit noch in Bearbeitung befindende ISO 14955 beinhaltet das Eco-Design von Werkzeugmaschinen. Künftig soll die Richtlinie im dritten Teil um die Beschreibung der Charakterisierung der Maschinenzustände erweitert werden (vgl. Weiss 2014, S. 19). Die dadurch erreichbare Transparenz kann Möglichkeiten für die Verbesserung der Energieeffizienz und eine energieoptimierte Maschinensteuerung aufzeigen. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das VDMA Einheitsblatt 34179, welches für die Identifikation von Energieeinsparpotenzialen eine gekoppelte Erfassung der Energiebedarfe in Abhängigkeit der Maschinenzustände darlegt.

Im Zuge der in Kapitel 3.3.3 durchgeführten Potenzialstudie sind die gängigsten Stand-by-Strategien bzw. Strategien zur Energiebedarfsreduktion eines hochmodernen Fertigungssystems bestimmt worden. Diese sowie auch die in der Literatur beschriebenen Mechanismen werden nachfolgend erläutert.

Vielfach wird rein durch organisatorische Maßnahmen ein energieeffizienter Zustand oder ein Stand-by-Betrieb durch einen Mitarbeiter eingeleitet. Die Maschinensteuerung bietet die Möglichkeit, die gesamte Maschine, einzelne Funktionsbaugruppen oder Komponenten in ihrer Leistungsaufnahme zu drosseln oder ganz herunterzufahren. Dies erfolgt durch vordefinierte Programme oder durch die Auswahl einzelner Komponenten in der Maschinensteuerung von einem Mitarbeiter. Für einen erneuten Produktionsstart wird die Maschine durch den Mitarbeiter reaktiviert.

Zudem finden automatisierte und zeitbasierte Abschaltstrategien Einsatz im industriellen Umfeld. Die Maschinensteuerung besitzt Stand-by-Programme, welche das Energiemanagement der Maschine in Abhängigkeit des Maschinenzustands ausführt (vgl. Wolff et al. 2013, S. 104). Nach einer definierten Zeitspanne erfolgt der automatische Wechsel in einen energetisch günstigeren Zustand. Stehen wieder Bauteile für die Bearbeitung bereit, erfolgt nach einer spezifischen Hochlaufphase das selbstständige Fortsetzen der Produktion (vgl. Siemens AG 2011; Heidenhain 2010; DMG Mori Company Limited 2016; Gleason-Pfauter Maschinenfabrik GmbH). Die programmtechnische Umsetzung energiesparender Betriebszustände erfolgt in der Praxis meist in verschiedenen Ausprägungen. Häufig existiert nicht ein einzelner Stand-by-Betriebsmodus, sondern es erfolgt eine mehrstufige Reduktion des Energiebedarfs in verschiedenen Stand-by-Modi (vgl. u.a. Rummel 2013; Schlechtendahl et al. 2013, S. 164; Eberspächer und Verla 2013, S. 643; Weinert und Mose 2014, S. 92; Schmitt et al. 2011, S. 256).

Die beschriebenen Verfahren können hinsichtlich ihres Nutzungsgrads optimiert werden. Dieses Ziel verfolgen verschiedene Forschungsprojekte und Arbeitsgruppen.

Wolff (2013, S. 165) beschreibt wesentliche Aspekte und Anforderungen für die Integration von erweiterten Energieeinsparstrategien in die Automobilindustrie. Er definiert dafür fünf Anforderungen, welche für eine erfolgreiche Integration mindestens erforderlich sind. Die Fertigungsbereiche sind am Entscheidungsprozess zu beteiligen, welche Maschinen- und Anlagenkomponenten in einen Stand-by-Betrieb versetzt werden können (vgl. Wolff et al. 2013, S. 6). Weiter ist die Steuerungseinheit, welche den energiesparenderen Zustand einleitet, festzulegen. Dies muss sowohl für die Fertigungssysteme, Maschinen und Maschinenkomponenten erfolgen (vgl. Wolff et al. 2013, S. 167). Zudem müssen die erforderlichen Abschaltsequenzen für das Herunterfahren der Maschine, der Maschinenkomponenten sowie der Transport- und Handlingssysteme integriert sein (vgl. Wolff et al. 2013, S. 167). Auch die Übergangszeiten für das Einnehmen und Verlassen eines Energiesparmodus müssen bekannt sein (vgl. Wolff et al. 2013, S. 167). Zusätzlich sollen eine Klärung der Rahmenbedingungen sowie technische Einschränkungen erfolgen. Diese können sich auf die maximale Anzahl an Wechseln in einen Energiesparmodus als auch auf den Verzicht auf diesen beziehen (vgl. Wolff et al. 2013, S. 167).

Weitere Anforderungen zur Optimierung des Energiebedarfs in unproduktiven Phasen beschreibt ein Projekt am Beispiel einer Getriebefertigung. Als Kernpunkte für die Optimierung definiert es die Schaffung von Transparenz, standardisierte Lösungen zur Energieeffizienzsteigerung sowie die Entwicklung eines Energiemanagementsystems (vgl. Schöfberger et al. 2010, S. 5–11). Zusätzlich wird die Wichtigkeit einer zentralen Leittechnik zur Reduktion des Energiebedarfs in unproduktiven Zeiten hervorgehoben (vgl. Schöfberger et al. 2010, S. 11). Diese kann beispielsweise durch die Kopplung mit einem SCADA-System erfolgen, welches in geplanten Pausen die Maschinen in einen Stand-by-Modus überführt. Die Informationen, wann eine Pause eintritt, liefert ein Energiemanagementsystem, in welchem ebenfalls die Produktionsplanung stattfindet (vgl. Schöfberger et al. 2010, S. 16–22). Die Firma Bosch Rexroth implementiert im Rahmen eines Forschungsprojekts einen Stand-by-Manager in eine Maschinensteuerung. Dieser arbeitet ereignisgesteuert und versetzt einzelne Funktionsbaugruppen in einen energieärmeren Zustand. Die Stand-by-Funktionen werden dabei durch maschineninterne Ereignisse oder durch extern bereitgestellte Ereignisse, z.B. über ein Leitsystem, eingeleitet. (vgl. Abele et al. 2011a, S. 66).

Zusätzlich zu der Maschinensteuerung als Umsetzungsebene werden die Simulation des Material- und Energieflusses für die Ermittlung energieeffizienter Stand-by-Strategien verwendet (vgl. Wolff et al. 2013, S. 103–105). Der Wechsel der Maschinen in einen Stand-by-Modus wird dabei für verschiedene Reaktionslogiken simuliert. Hervorzuheben ist, dass sich bestehende Studien

materialflussorientierter Stand-by-Strategien bedienen, in denen Puffer und der jeweils vor- und nachgelagerte Prozess Berücksichtigung finden. Eine Studie zeigt, dass im untersuchten Fall vorhandene Stand-by-Strategien ca. 50 % des Gesamtpotenzials ausschöpfen. Weiter wurde festgestellt, dass eine ausbringungsneutrale Reduzierung des Energiebedarfs mit einer materialflussorientierten Energieeinsparstrategie nicht möglich ist (vgl. Wolff et al. 2013, S. 106–107).

Eine Start-Stopp-Automatik für Automatisierungsprozesse entwickelte Mechs (Mechs et al. 2013), welche sowohl in der MES als auch auf der Feldebene integriert ist. Die Lösung beinhaltet die Entwicklung von energiezentrierten Systemmodellen, welche die Beziehungen und strukturellen Eigenschaften verschiedener Subsysteme beschreiben (vgl. Mechs et al. 2013, S. 33–34). Mithilfe der Systemmodelle erfolgen für ein bekanntes Zeitfenster die Strategieberechnung und Optimierung, welche anschließend auf der Feldebene des Automatisierungssystems ausgeführt werden (vgl. Mechs et al. 2012, S. 253). Das Ausführen der Strategie führt zu einem Wechsel des Energiezustands der Subsysteme, wodurch Energieeinsparungen realisiert werden könnten (vgl. Mechs et al. 2013, S. 37–38).

Die Anbindung von Maschinen an übergelagerte Systeme für ein zentrales Energiemanagement ist als Produkt von verschiedenen Produzenten am Markt verfügbar. Vielfach erfolgt eine funktionelle Erweiterung bestehender MES-Systeme. Die Kopplung der Steuerungstechnik mit den Managementsystemen kann dafür durch die Entwicklung systemspezifischer Funktionsbausteine erfolgen (vgl. Abele et al. 2015, S. 300). Die Kommunikation wird dabei meist mit TCP/IP basierten Übertragungsprotokollen realisiert.

So beinhaltet der Automatisierungsbuss Sercos III als Funktionalität das Energieprofil Sercos Energy, welches eine Erweiterung des Geräteprofils der Peripheriekomponenten darstellt. Komponenten, welche Sercos Energy Funktionen beinhalten, können auf Basis des Kommunikationsstandards Sercos III gezielt in einen energieeffizienten Zustand versetzt werden (vgl. Schlechtendahl 2012, S. 4). Um dies zu ermöglichen, sind komponentenspezifische und produktionsspezifische Informationen notwendig. Diese werden durch die Untergliederung der Kommunikationsstruktur des Sercos Energy-Profiles in zwei Ebenen bereitgestellt. In einer übergeordneten Leitsystemebene werden kurze, lange und ungeplante Pausen erkannt und nutzbar gemacht. Die ermittelten Informationen werden anschließend an die darunter liegende Maschinenebene übertragen (vgl. Schlechtendahl 2012, S. 5).

Auf der Maschinenebene überführt Sercos Energie die Komponenten, in Abhängigkeit der Pausenlänge, in einen energieeffizienten Betriebszustand (vgl. Schlechtendahl 2012, S. 5). So kann

bei flexiblen Fertigungsanlagen ein Teilmaschinenbetrieb realisiert werden. Einzelne Maschinenkomponenten werden dafür erst unmittelbar vor ihrem benötigten Zeitpunkt aktiviert (vgl. Schlechtendahl 2012, S. 6). Weitere Funktionalitäten sind ein Teillastbetrieb und die Messung und Visualisierung energetisch relevanter Kenngrößen (vgl. Schlechtendahl 2012, S. 6).

Der PROFIenergy Kommunikationsstandard ist wie auch SercosEnergy eine Erweiterung des Geräteprofils der Peripheriekomponenten um Funktionalitäten, mit welchem diese bei Bedarf in einen energetisch günstigen Zustand versetzt werden können (vgl. PROFIBUS Nutzerorganisation e. V. 2011, S. 4, 2016, S. 3). PROFIenergy ermöglicht über standardisierte Kommandos, basierend auf dem Kommunikationsstandard PROFINET, das Abschalten von Verbrauchern in kurzen, langen und ungeplanten Pausen. Zudem ist das Erfassen und Visualisieren relevanter Informationen möglich (vgl. PROFIBUS Nutzerorganisation e. V. 2016, S. 4, 2011, S. 3).

2.3.1 Thematische Abgrenzung

Der hohe Energiebedarf von Werkzeugmaschinen in unproduktiven Zeiten ist bekannt und die Maschinenhersteller sowie auch verschiedene Forschungsprojekte haben auf Maschinenebene unterschiedliche Abschaltkonzepte entwickelt. Für eine optimale Funktion dieser Konzepte/Systeme ist eine häufig genannte Bedingung die Information über das zeitliche Auftreten und die zeitliche Dauer einer Pause. Diese Informationen sollen übergeordnete Leitsysteme liefern. Die Möglichkeiten zur Anbindung der Maschinen und Anlagen an Leitsysteme sind hinreichend entwickelt, auch Übertragungsprotokolle mit Energieeinsparfunktionalitäten sind verfügbar. Das zeitliche Auftreten und die Dauer von Pausen sollen meist Produktionsplanungssysteme liefern, welche Informationen über die Schicht- und Pauseneinteilung besitzen. Die Möglichkeiten dieser Systeme sind jedoch stark beschränkt, da aufgrund der überwiegend statischen Datenbasis die aktuelle Produktionssituation nicht berücksichtigt werden kann.

In Abgrenzung zu bestehenden Forschungsaktivitäten erfolgt die Erforschung von Steuerungsalgorithmen, welche als Leitsystem arbeitend, geplante und ungeplante Unterbrechungen im Fertigungssystem erkennen, die zeitliche Dauer prognostizieren und die Informationen an die Maschinen übertragen. Ein Schwerpunkt des Ansatzes ist die Prognose von kurzen Unterbrechungen und die Erarbeitung von Möglichkeiten für deren Nutzung zur Energiebedarfsreduktion.

Kapitel 3

Basisdaten und deren Analyse

Ökonomische und ökologische Entscheidungen werden mithilfe von Informationen getroffen. Die Qualität und Vollständigkeit der Informationen entscheidet maßgeblich, ob eine getroffene Entscheidung das gewünschte Ergebnis liefert. Im Bereich der Energieeffizienz werden diese Informationen meist in Form von Energie- und Stoffströmen erhoben, welche anschließend über die Verknüpfung mit z.B. Produktionsdaten in Kennzahlensystemen eine Bewertung zulassen. Je größer die betrachteten Systemgrenzen werden, desto aufwendiger wird die messtechnische Erfassung sowie die Analyse und Auswertung der erhaltenen Daten. Gerade im Bereich der Bewertung des Potenzials durch einen Stand-by-Betrieb von Maschinen gehen bestehende Studien in der Ausweisung der Potenziale weit auseinander. Die Gründe dafür sind meist die Betrachtung unterschiedlicher Fertigungssysteme, verschieden großer Systemgrenzen und das Fehlen von Realdaten. Kombinierte Simulationsstudien aus Energie- und Materialfluss ermöglichen Potenzialbewertungen von Betriebsstrategien ganzer Produktionsbereiche, doch besteht auch hier das Problem einer ausreichenden Datenbasis. Das folgende Kapitel beschreibt anfänglich die für die Simulationsstudie erforderlichen Anforderungen an die Art der Daten sowie deren Qualität und Menge. Aufbauend darauf erfolgt die Darstellung von Möglichkeiten zur automatischen Auswertung und der Informationsgewinnung aus Energiedaten. Abschließend wird eine erste Einschätzung über bestehende Potenziale und Ansatzpunkte zur Steigerung der Energieeffizienz durch einen optimierten Stand-by-Betrieb gegeben.

3.1 Basisdaten

Die für die Potenzialstudie erforderlichen Energie- und Stoffstromdaten basieren auf der Analyse eines Fertigungssystems zur Herstellung von Getrieben. Die Datenaufnahme erfolgt über ein Energiemonitoringsystem und der einzelnen Vermessung energetisch relevanter Prozesse. Die Messstrategie beinhaltet sowohl top-down als auch bottom-up Messungen. Zusätzlich werden die Energiedaten mit bestehenden MES und SCADA-Systemen verknüpft, welche z.B. Informationen über gefertigte Stückzahlen oder Qualitätsdaten enthalten. Top-down erfolgt die Vermessung der elektrischen Verteilerpunkte, welche ganze Hallenabschnitte versorgen. Auch die Messung der Prozess- und Versorgungsanlagen, wie z.B. die Druckluftbereitstellung oder/und Kühlwasserbereitstellung, erfolgt anhand dieser Methode. Relevante Einzelmaschinen werden separat bottom-up vermessen. Das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute System enthält derzeit ca. 400 Messstellen und wird kontinuierlich erweitert. Ca. 150 Messstellen entfallen auf die Vermessung der elektrischen Leistungsaufnahme und des Druckluftbedarfs von Werkzeugmaschinen. Weitere 150 Messpunkte ermitteln die elektrische Leistungsaufnahme der Verteilerpunkte. Die restlichen Messpunkte verteilen sich auf Montageprozesse, verschiedene Warmbehandlungsanlagen und die Prozess- und Versorgungstechnik. Zusätzlich erfolgt die komponentenweise Vermessung von 10 Werkzeugmaschinen hinsichtlich der elektrischen Leistungsaufnahme für verschiedene Betriebszustände. Tabelle 3.1 zeigt die der Arbeit zugrundeliegenden Messdaten und deren Auflösung.

Tabelle 3.1: Messdatengrundlage und deren Auflösung

Bereich	Tag	Woche	Monat	Jahr
Werkzeugmaschine	1 s	1 s	1 min	15 min
Werkzeugmaschine komponentenweise	150 ms	-	-	-
Bereiche der Montage	15 min	15 min	15 min	15 min
Hallen Verteilerpunkte	15 min	15 min	15 min	15 min
Prozess- und Versorgungsbereiche	1 s	1 s	1 min	15 min
Warmbehandlungsanlagen	1 s	1 s	1 min	15 min
Häufigkeitsverteilung Maschinenstillstand	x	x	x	-
Zeitlicher Verlauf Maschinenstillstand	x	x	-	-
Maschinenzustände	x	x	-	-
Stückzahlen	x	x	x	x

Die Daten werden in Energie- und Produktionsdaten unterteilt. Die Messung der Energiedaten erfolgt dabei überwiegend kontinuierlich in zeitlich definierten Intervallen. Zur Begrenzung der

Datenmenge erfolgt die Aggregation zu zeitlichen Mittelwerten für die historische Archivierung. Die Produktionsdaten werden teilweise mithilfe geeigneter Auswerteverfahren aus Energiedaten gewonnen (vgl. Kapitel 3.2), über das Energiemonitoring-System miterfasst oder aus den bestehenden MES- und SCADA-Systemen entnommen. Die erhobenen Daten sind die Grundlage der in Kapitel 3.3 durchgeführten Potenzialanalysen. Zudem erfolgt ein Teil der Modellvalidierung und Modellverifikation anhand dieser Daten.

3.2 Informationsgewinnung aus Energiedaten

Kontinuierlich erhobene Energiedaten enthalten neben den für Abrechnungszwecke verwendeten Informationen noch viele weitere. Mithilfe geeigneter Verfahren lassen sich diese aus den Energiedaten extrahieren und dem Nutzer zugänglich machen. Die für diese Arbeit relevanten Informationen sind die statistische Verteilung von Unterbrechungen im Produktionsablauf, der dazugehörige Materialfluss, die produzierten Stückzahlen sowie die unterschiedlichen Maschinenzustände der einzelnen Maschinen eines gesamten Fertigungssystems. Ein Teil dieser Daten kann aus MES-Systemen gewonnen werden, jedoch variieren diese in ihrer Aussagekraft je nach Ausbau- und Detaillierungsgrad der Systeme. Die Betrachtung der Energiedaten von Maschinen oder auch Prozesse zeigt, dass diese meist sich periodisch wiederholende Muster aufweisen. Diese zu erkennen, zu analysieren und zu klassifizieren ist Ziel der Mustererkennung. Niemann (1983, S. 19–26) beschrieb das grundsätzliche Vorgehen der Mustererkennung in sechs Postulaten. In Anlehnung an diese erfolgt das weitere Vorgehen, welches in Abbildung 3.1 dargestellt ist.



Abbildung 3.1: Vorgehensmodell der Mustererkennung

Die erhobenen Energiedaten stellen die repräsentative Stichprobe dar, die auf Merkmale untersucht und anschließend zu Mustern zusammengefasst wird. Danach erfolgt die Einordnung der Muster in Klassen. Anhand der Zuordnung der Klassen zu Ereignissen können z.B. Aussagen über die Anzahl der gefertigten Bauteile oder den Betriebszustand einer Maschine getroffen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Vielzahl verschiedener Maschinen und Prozesse analysiert. Die Beschreibung und Klassifikation der Muster erfolgt dabei durchgehend manuell; auf Verfahren wie maschinelles Lernen wird verzichtet. Dieses Vorgehen ist vorteilhaft, da sich gezeigt hat, dass die Abweichungen der Merkmale in den Mustern meist relativ klein sind und eine

mathematische Beschreibung der Muster oder des dominanten Merkmals anhand weniger Analysemethoden ermittelt werden kann.

3.2.1 Merkmalbeschreibung von Leistungsprofilen

Die Messergebnisse von Energie- und Stoffstromanalysen zeigen häufig den zweidimensionalen kontinuierlichen Zusammenhang einer Messgröße in Abhängigkeit der Zeit. Je nach Messaufgabe können die Messdaten sich periodisch oder stochastisch wiederholende Muster enthalten. Im Gegensatz zu sich kontinuierlich periodisch wiederholenden Mustern sind stochastisch verteilte Muster eindimensional auf der Zeitachse verschoben. Am Beispiel des elektrischen Energieverlaufs einer Schleifmaschine (Abbildung 3.2) sind verschiedene Zustände der Maschine über einen Zeitraum von einer Stunde dargestellt. Der Leistungsverlauf zeigt, dass die Maschine anfänglich ca. alle 45 Sekunden ein Bauteil produziert. Der Energieverlauf ist durch einen spezifischen, sich periodisch wiederholenden Verlauf charakterisiert. Anschließend folgt eine Phase, in der keine Bauteile bearbeitet werden. Die Maschine ist betriebsbereit und hat, bedingt durch die betriebenen Nebenaggregate, eine konstante Leistungsaufnahme. Nach ca. 28 Minuten wird ein Stand-by-Betrieb eingeleitet und die Leistungsaufnahme ist ebenfalls konstant, aber auf einem wesentlich geringeren Niveau. Nach der Stand-by-Phase erfolgt ein Werkzeugwechsel in der Maschine.

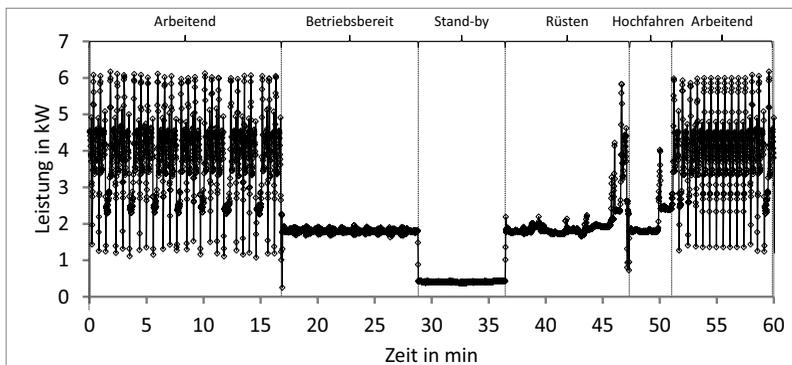


Abbildung 3.2: Beispiel einer automatischen Analyse von Maschinenzuständen

Der Leistungsverlauf der Rüstphase ist durch die Grundlast der Nebenaggregate analog zum Zustand *Betriebsbereit* dominiert. Hinzu kommen noch kurze Leistungsschwankungen durch den Werkzeugwechsel mit einer abschließenden Leerfahrt des Bearbeitungszyklus. Daran anschließend folgt eine kurze Warmlaufphase, nach welcher die Maschine wieder in den Zustand

Arbeitend wechselt. Es ist zu erkennen, dass jedem Maschinenzustand ein spezifisches Profil zugeordnet werden kann. Der Fokus der Merkmalbeschreibung liegt auf dem Erkennen des Musters des jeweiligen Maschinenzustands (Z_x). Anhand dieser Information können Unterbrechungen im Produktionsablauf, die zugehörigen Verteilfunktionen und der Materialfluss berechnet werden. Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4 zeigen die verwendeten Analyseverfahren zur Bestimmung verschiedener Maschinenzustände. Dabei kommen für die Zustandsbestimmung sowohl einzelne als auch eine Kombination der verschiedenen Analysemethoden zum Einsatz.

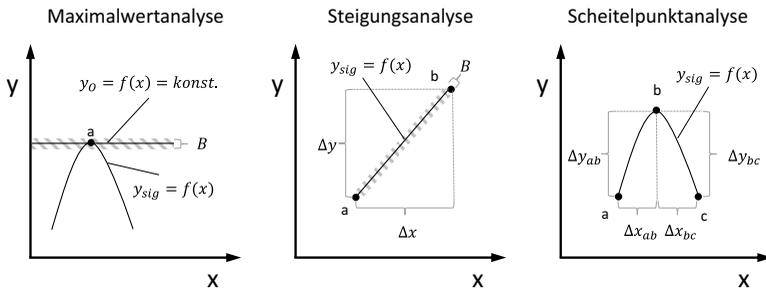


Abbildung 3.3: Analyseverfahren zur Maschinenzustandsbestimmung (Teil 1)

Eine einfache aber auch fehleranfällige Methode ist die Maximalwertanalyse. Bei dieser wird der Zustand der Maschine (Z_{xMax}) anhand einer Schwellenwertfunktion ($y_0 = f(x) = konst$) mit einem Toleranzband (B) ermittelt. Die Schwellenwertfunktion zeigt für jedes Intervall einen gleichen konstanten Wert. Für die Analyse wird jedes Messintervall der Signalfunktion ($y_{sig} = f(x)$) mit der Schwellenwertfunktion verglichen (vgl. Formel (3.1)).

$$Z_{xMax} = f(x) = \begin{cases} 1 & y_{sig}(x) = y_0(x) \\ 0 & y_0(x) < y_{sig} > y_0(x) \end{cases} \quad (3.1)$$

Erreicht die Signalfunktion die Schwellenwertfunktion und liegt im Toleranzband, wird dies als der gewünschte Zustand gewertet. Diese Analysemethode eignet sich für Maschinen und Prozesse, welche sehr gleichmäßige Energiesignaturen aufweisen.

Eine weitere Methode ist die Steigungsanalyse. Diese errechnet die Steigung zwischen zwei definierten Messintervallen und vergleicht diese anschließend mit einer zu bestimmenden Grenzfunktion ($G = \frac{\Delta y_{max}}{\Delta x_{max}} = Konst.$). Die Grenzfunktion stellt ein Maximum der Steigung dar. Wird dieses erreicht oder überschritten, wird dies als der gesuchte Maschinenzustand gewertet (vgl. Formel (3.2)).

$$Z_{xStg} = f(x) = \begin{cases} 1 & \frac{\Delta y_{ab}}{\Delta x_{ab}} \geq G \\ 0 & \frac{\Delta y_{ab}}{\Delta x_{ab}} < G \end{cases} \quad (3.2)$$

Bei der Scheitelpunktanalyse erfolgt die Errechnung der Steigung von drei aufeinanderfolgenden Messintervallen der Signalfunktion. Diese werden hinsichtlich des Steigungsverlaufs ausgewertet. In Bezug auf Abbildung 3.3 zeigt Formel (3.3) den mathematischen Zusammenhang.

$$Z_{x\Delta Stg} = f(x) = \begin{cases} 1 & \frac{\Delta y_{ab}}{\Delta x_{ab}} \geq 0 > \frac{\Delta y_{bc}}{\Delta x_{bc}} \\ 0 & \frac{\Delta y_{ab}}{\Delta x_{ab}} > 0 < \frac{\Delta y_{bc}}{\Delta x_{bc}} \end{cases} \quad (3.3)$$

Erfolgt in der Signalfunktion ein Wechsel von positiver zu negativer Steigung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messintervallen, wird dies als der gesuchte Maschinenzustand gewertet. Weitere Analysemethoden sind die Gültigkeits- und Flächenintegralanalyse, welche in Abbildung 3.4 dargestellt sind.

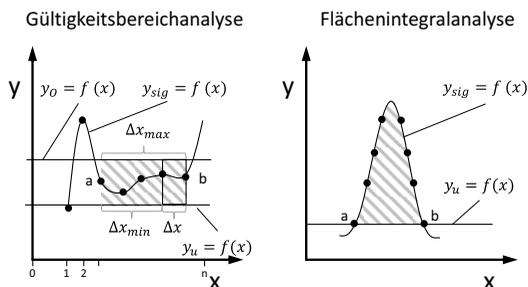


Abbildung 3.4: Analyseverfahren zur Maschinenzustandsbestimmung (Teil 2)

Die Gültigkeitsbereichanalyse definiert durch zwei Grenzfunktionen $y_0 = f(x) = konst.$ und $y_u = f(x) = konst.$ einen Bereich der Y-Achse. Sobald sich die Signalfunktion (y_{sig}) im Gültigkeitsbereich der Y-Achse befindet, startet die Berechnung eines Gültigkeitsintervalls I entlang der X-Achse (vgl. Formel (3.4)).

$$I = f(x) = \begin{cases} x_{(n)} - x_{(a)} & |y_0 \geq y_{sig} \geq y_u \\ 0 & |sonst \end{cases} \quad (3.4)$$

Durch die maximale und minimale Länge (Δx_{max} & Δx_{min}) des Gültigkeitsintervalls wird die Anzahl der zulässigen Messintervalle beschrieben, in welcher die obere und untere Grenzfunktion nicht über- bzw. unterschritten werden darf. Liegt die Signalfunktion f_{sig} innerhalb des gültigen Y-Achsenabschnittes und erfüllt die Bedingung des Gültigkeitsintervalls der X-Achse, wird dies als gesuchter Maschinenzustand gewertet (vgl. Formel 3.5).

$$Z_{xBer} = f(x) = \begin{cases} 1 & | y_O \geq y_{sig} \geq y_u \wedge \Delta x_{min} \geq I \leq \Delta x_{max} \\ 0 & | y_O \leq y_{sig} \leq y_u \end{cases} \quad (3.5)$$

Die Flächenintegralanalyse berechnet die Fläche zwischen der Signalfunktion und einer definierten Grenzfunktion. Das Ergebnis wird anschließend mit einem tolerierten Erwartungsbereich ($EB = \overline{EB} \pm \Delta EB$) verglichen. Durch eine Grenzfunktion (y_u) werden die Integrationsgrenzen bestimmt. Überschreitet die Signalfunktion den Wert der Grenzfunktion, erfolgt die Integration der Messintervalle solange, bis die Signalfunktion die Grenzfunktion unterschreitet.

$$Z_{xI} = \begin{cases} 1 & | \overline{EB} - \Delta EB < \int_a^b (y_{sig} - y_u) dx < \overline{EB} + \Delta EB \\ 0 & | \overline{EB} - \Delta EB > \int_a^b (y_{sig} - y_u) dx \\ 0 & | \overline{EB} + \Delta EB < \int_a^b (y_{sig} - y_u) dx \end{cases} \quad (3.6)$$

Liegt der Flächeninhalt innerhalb des Erwartungsbereichs, wird dies als gesuchter Maschinenzustand gewertet.

Vorteile/Nachteile

Die Ermittlung der Maschinenzustände von Werkzeugmaschinen kann i.d.R. gut anhand der beschriebenen Mechanismen erfolgen. Häufig ist es vorteilhaft, eine Kombination der verschiedenen Verfahren einzusetzen. Auch ist es möglich, in einer Auswertung verschiedene Zustände der Maschine zu ermitteln. Dabei ist die Berechnung aufgrund fehlender Iterationsschritte sehr schnell. Zudem ist diese Methode sehr zuverlässig, wenn der gesuchte Zustand hinreichend gut beschrieben ist und der Prozess einen stabilen reproduzierbaren Energieverlauf aufzeigt. Jedoch hat dieses Verfahren Grenzen. Bei stark driftenden Energieverläufen, z.B. durch die Abnutzung eines Werkzeuges oder bei sehr geringen Änderungen der Leistungsaufnahme zwischen verschiedenen Maschinenzuständen sowie Prozessen, bei denen die benötigte Zeit der Bearbeitung stark vom Bauteilzustand abhängt, stellt sich die Anwendung schwierig dar.

3.2.2 Stückzahl und Pausenermittlung

Zur Bestimmung der Stückzahlen und weiteren Größen erfolgen Untersuchungen der Lastgänge mithilfe der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Analysemethoden. Abbildung 3.5 zeigt eine exemplarische Auswertung einer Mustererkennung über 20 Stunden. Die Merkmalsbeschreibung erfolgt dabei für die Zustände *Arbeitend*, *Betriebsbereit* und *Stand-by*. Der Zustand *Arbeitend* wird anhand einer Bereichsanalyse ermittelt, die Zustände *Betriebsbereit* und *Stand-by* werden mithilfe einer Steigungsanalyse festgestellt.

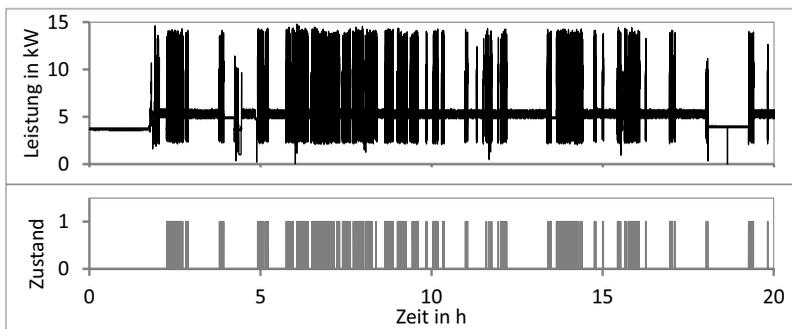


Abbildung 3.5: Stückzahlenermittlung anhand von Energiedaten

Die Stückzahlen für den analysierten Zeitraum werden aus der Summe der Zustandswechsel des Maschinenzustands *Arbeitend* ermittelt. Zusätzlich kann im regulären Betrieb (die Maschine wird ohne Unterbrechungen mit Teilen versorgt) die Taktzeit oder Zykluszeit des Prozesses bestimmt werden. Die Auswertung der Unterbrechungen im Produktionsablauf erfolgt anhand der zeitlichen Länge und Häufigkeit der Zustände *Betriebsbereit* und *Stand-by*. Zudem wird anhand der zeitlichen Unterbrechungen die aktuelle Maschinenverfügbarkeit errechnet. Abschließend wird die prozentuale Verteilung der Maschinenzustände bezogen auf die Gesamtdauer ermittelt. Da die Zustände *Rüsten*, *Hoch-/Runterfahren* und *Gestört* im normalen Produktionsablauf einer Großserienfertigung relativ selten auftreten (Werkzeugmaschinen werden typischerweise mit einer vom Hersteller garantierten Verfügbarkeit zw. 96 % und 99 % verkauft), werden diese bei der Analyse zu einer Gruppe zusammengefasst. Existiert keine Übereinstimmung zwischen den definierten Merkmalen der jeweiligen Maschinenzustände und dem aktuellen Energieverlauf, wird dieses Intervall der Gruppe zugeordnet.

3.2.3 Materialflussermittlung

Bei der Planung einer Fertigungslinie ist der exakte Materialfluss nicht bekannt. Für die Auslegung des Fertigungssystems im Planungsprozess erfolgt deshalb häufig eine Materialflusssimulation. Dennoch kommt es oft, z.B. durch Änderungen an den Prozessen, zu einer Veränderung im Materialfluss und somit evtl. zu einer Verschlechterung der Produktionsleistung des Fertigungssystems. Der Materialfluss einer Bauteilfertigung, ausgeführt als Fließfertigung ohne Zeitzwang, ist im Idealbetrieb (ohne Hochlauf-, Wartungs- und Störphasen) maßgeblich von der Art der Beladung des Verkettungssystems mit Bauteilen abhängig. Die Charakteristik der Beladung anhand von Energiedaten zu bestimmen, ist Ziel der Materialflussermittlung. Die gewonnenen Beladungsstrategien dienen im Kapitel 6 sowohl der Parametrierung als auch einer Verifikation und Validierung von Teilmodellen. Zudem könnten die Daten für eine nachträgliche Optimierung des Prozessablaufs genutzt werden. Ein dafür häufig verwendetes Werkzeug ist die Wertstromanalyse, welche das Fertigungssystem hinsichtlich nicht wertschöpfender Tätigkeiten analysiert und diese nach Möglichkeit eliminiert.

Vorgehensweise

Die Reihenfolge für die Bearbeitung von Bauteilen ist in der Regel vorgegeben. Jedes Bauteil durchläuft somit eine feste Arbeitsfolge. Das führt dazu, dass sich Unterbrechungen in einem Prozess auf die nachfolgenden Prozesse auswirken. Kommt es beispielsweise zu einer längeren Unterbrechung bei der Bereitstellung der Bauteile, wirkt sich dies auf alle nachgelagerten Prozesse aus und ist im Energiebedarf der Maschinen sichtbar. Nicht jede Unterbrechung im Materialfluss oder eine Maschinenstörung hat einen Einfluss auf nachgelagerte Prozesse. Kurze Unterbrechungen werden meist durch einen Teileüberschuss auf den Förderstrecken kompensiert. Abbildung 3.6 zeigt exemplarisch die Energieverläufe von zwei direkt aufeinander folgenden Prozessen. Es ist deutlich sichtbar, dass sich ein länger anhaltender Teilemangel am vorgelagerten Prozess verspätet auf den Nachfolgeprozess auswirkt. Die zeitliche Verschiebung der Unterbrechungen zwischen den Prozessen ist maßgeblich von der zur Verfügung stehenden Anzahl an Bauteilen des Nachfolgeprozesses abhängig.

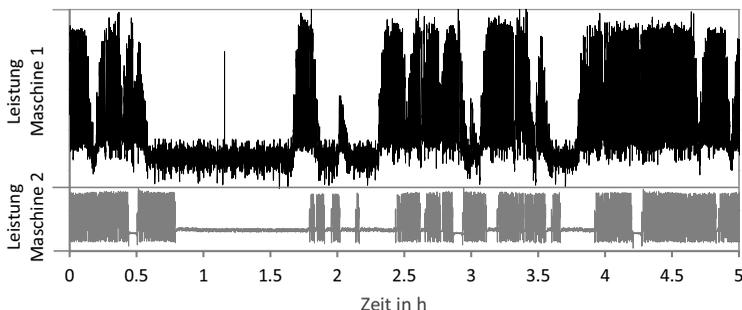


Abbildung 3.6: Materialflussermittlung anhand von Energiedaten

Der Zeitpunkt und das Intervall, in dem die Bauteile auf ein Fertigungssystem gelangen, werden meist nicht dauerhaft erfasst. Deshalb erfolgt die Ermittlung der Beladungszeitpunkte der einzelnen Fertigungslinien anhand des Energieverlaufs. Die Bestimmung erfolgt an der ersten Maschine unmittelbar nach der Teilebeladung. Dazu werden die Maschinenzustände *Arbeitend* und *Betriebsbereit* detektiert. Anhand des zeitlichen Verlaufs der bearbeiteten Teile kann die Beladung der Anlage bzw. das Bereitstellen der Bauteile für den Prozess bestimmt werden. Längere Phasen im Bereitschaftsbetrieb werden als Beladungspausen interpretiert. Dennoch kann die Beladungsstrategie nicht exakt abgebildet werden. Die Transportzeit und evtl. vorhandene Teilepuffer dämpfen den Effekt von kurzzeitigen Ereignissen.

3.2.4 Prozessüberwachung

Neben den prozess- und maschinenspezifischen Informationen lassen sich auch Informationen zur Prozessdiagnose aus den Energiedaten ableiten. Treten (deutliche) Abweichungen von spezifischen Grenzwerten auf, ist dies ein Indikator für einen „fehlerhaften Prozess“, der sich in der Herstellung eines Ausschussprodukts äußern kann oder im Extremfall sogar einen Maschinenausfall ankündigt. Die Analyse kann sowohl auf Basis einzelner Energieprofile (z.B. nur Strom) als auch aus den überlagerten Profilen mehrerer Energieträger (Strom, Druckluft, Wärme, Kälte) erfolgen. Abbildung 3.7 zeigt exemplarisch den Energieverlauf einer Außenrundscheifmaschine. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Energieverlauf über den zeitlichen Verlauf abnimmt.

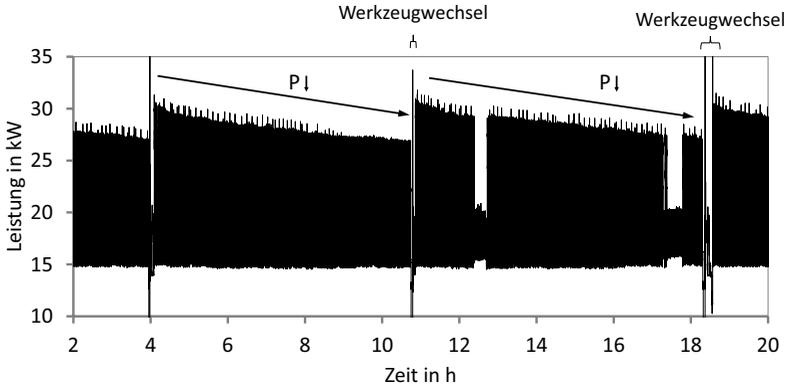


Abbildung 3.7: Veränderung des Energieverlaufs einer WZM aufgrund von Werkzeugverschleiß

Ein kontinuierlicher Vergleich der spezifischen Energiebedarfe für die Herstellung eines Bauteils lässt erkennen, dass sich der Energiebedarf in einem Zeitraum von sieben Stunden um ca. 13 % verringert. In diesem Beispiel kann der Effekt durch die Abnutzung der Schleifscheibe beschrieben werden. Die Maschine betreibt die Schleifscheibe immer mit einer gleichen Umfangsgeschwindigkeit. Die Verringerung des Schleifscheibendurchmessers führt somit zu einer Erhöhung der Spindeldrehzahl, was ein Verschieben des Betriebspunktes verursacht und zu einer Wirkungsgradverbesserung des Spindelanstriebs führt. Bei Fräsprozessen konnte ein gegenläufiger Effekt ermittelt werden.

3.3 Potenzialstudie

Ziel dieser Studie ist es, das theoretische Einsparpotenzial eines optimalen Stand-by-Betriebs einer Baugruppenfertigung zu bestimmen. Zudem dienen die gewonnenen Daten der späteren Parametrierung der Simulationsmodelle, mit welchen im Kapitel 6 das technische sowie wirtschaftliche Einsparpotenzial in Abhängigkeit unterschiedlicher Randbedingungen in Form einer Szenarienstudie ermittelt wird. Die Datenerhebung erfolgt anhand einer Bauteilfertigung zur Herstellung von Getriebebauteilen. Die Fertigung ist in verschiedene Bereiche unterteilt. Der erste Bereich ist die Grünfertigung. In dieser erfolgt die Herstellung der Bauteilgeometrie bis nahe der Endkontur. Der zweite Bereich ist die Härterei, in welcher die Bauteile gehärtet werden. Im dritten Bereich der Hartfertigung folgt die Erzeugung der Endkontur. Die Grünfertigung beinhaltet für die Bearbeitung ca. 40 Werkzeugmaschinen. Diese sind in 5 Linien unterteilt und durch ein Transfersystem miteinander verbunden. Im zweiten Bereich befinden sich drei Vakuumhärteöfen mit jeweils 8 Behandlungskammern. Die Hartfertigung umfasst 80 verkettete Werkzeugmaschinen

aufgeteilt in 6 Linien. Die Potenzialstudie untersucht ausschließlich die elektrischen Leistungen und elektrischen Energiebedarfe der Maschinen. Auf die Nennung der Energieform wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit zukünftig verzichtet.

3.3.1 Messkonzept

Das Messkonzept verfolgt zwei Ansätze. Die Energie- und Medienbedarfe werden einmal top-down und einmal bottom-up erfasst wobei im Bottom-up-Ansatz nicht alle Maschinen und Anlagen gemessen werden. Im Top-down-Ansatz erfolgt die Einteilung der Bauteilfertigung in Messbereiche. Diese Messbereiche stellen in der Regel komplette Fertigungslinien oder Fertigungsabschnitte dar. In diesen werden alle enthaltenen Maschinen und Anlagen erfasst. Eine verursachergerechte Zuordnung der Energiebedarfe ist bei dem Top-down-Ansatz nicht möglich, auch eine Aussage über evtl. Unterbrechungen im Produktionsprozess lässt sich damit nicht erkennen. Der Top-down-Ansatz alleine lässt keine Aussage bzgl. des theoretischen Einsparpotenzials durch einen optimierten Stand-by zu, enthält aber alle Maschinen und Anlagen und zeigt somit den Gesamtbedarf der Bauteilfertigung.

Zusätzlich zu der Messung gesamter Bereiche erfolgt die Vermessung einzelner Maschinen und Anlagen. Diese Einzel- und Komponentenvermessung über verschiedene Energieträger erfolgt bottom-up. Alle in der Bauteilfertigung vorkommenden energetisch relevanten Prozesse werden dabei erfasst. Tabelle 3.2 zeigt eine Auflistung der untersuchten Prozesse. Die Einzel- und Komponentenvermessung beinhaltet die Auswertung von 10 unterschiedlichen Prozessen bei einer Vermessung von 92 Einzelmaschinen. Dies entspricht einer Vermessung von 83 % aller energetisch relevanten Maschinen.

Für häufig vorkommende Prozesse, wie z.B. das Schleifen oder das Fräsen, erfolgte zusätzlich eine Untersuchung der Energiebedarfe auf Komponentenebene. Ziel des bottom-up-Ansatzes ist es, anhand des spezifischen Energieverlaufs Prozessoptimierungen abzuleiten, Großverbraucher zu erkennen und Unterbrechungen im Materialfluss des Fertigungssystems festzustellen.

Tabelle 3.2: *Untersuchte Einzelprozesse der Potenzialstudie*

Hersteller	Prozess	Anzahl	Anzahl gesamt	Komponente	Medien
Felss Holding GmbH	Axialumformen	1	2	Ja	Nein
J.G. WEISSER SÖHNE GmbH & Co. KG	Drehen	5	5	Ja	Nein
EMAG GmbH & Co. KG	Drehen	4	4	Nein	Nein
Gleason-Pfauter Maschinenfabrik GmbH	Fräsen	22	25	Ja	Ja
Präwema Antriebstechnik GmbH	Honen	8	10	Ja	Nein
NAGEL Maschinen- u. Werkzeugfabrik GmbH	Honen	7	8	Ja	Ja
Karl Klink GmbH	Räumen	2	2	Nein	Nein
Lindköping	Schleifen	3	4	Nein	Nein
Buderus Schleiftechnik GmbH	Schleifen	6	11	Ja	Ja
Erwin Junker Maschinenfabrik GmbH	Schleifen	2	2	Nein	Nein
Reishauer AG	Schleifen	11	13	Ja	Ja
EMAG GmbH & Co. KG	Schweißen	2	4	Nein	Nein
AJO Sigma GmbH	Strahlen	2	2	Nein	Nein
Profiroll Technologies GmbH	Walzen	3	4	Nein	Nein
Zippel GmbH	Waschen	14	14	Ja	Ja
In Summe		92	110		

Zudem kann mithilfe des Bottom-up-Ansatzes das theoretische energetische Einsparpotenzial eines idealen Stand-by-Betriebs berechnet werden. Dazu erfolgt für jeden Prozess der Bauteilfertigung die Ermittlung des bauteilspezifischen Energiebedarfs. Aus den Einzelmessungen kann so, anhand der produzierten Stückzahlen, der Energiebedarf für eine unterbrechungsfreie Produktion erfolgen. Dies erfolgt unter Vernachlässigung von Warmlaufzeiten, Rüstvorgängen und Störungen - auch geplante Pausen finden keine Berücksichtigung. Für Prozesse, die keine bauteilcharakteristische Energiesignatur aufweisen, wie z.B. bei den Waschanlagen, erfolgt der Bezug des Energiebedarfs auf die theoretische Fertigungszeit.

3.3.2 Ergebnisse Potenzialstudie Top-down

Abbildung 3.8 zeigt die Ergebnisse der Top-down-Messung über definierte Messbereiche. Die Messbereiche sind so gewählt, dass alle Maschinen und Anlagen, welche der Bauteilfertigung zuzuordnen sind, in den Messergebnissen enthalten sind. Die Datenerhebung erfolgt für einen Zeitraum von 3 Monaten bei einem regulären 3-Schicht-Betrieb mit 17 Schichten in der Woche.

Durchschnittliche elektrische Gesamtleistung

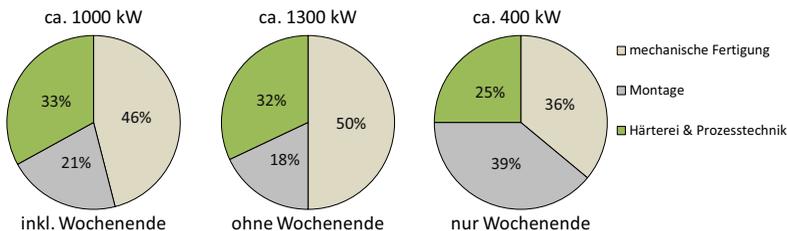


Abbildung 3.8: Elektrische durchschnittliche Gesamtleistung der Bauteilfertigung (Top-down)

Die Auswertung unterteilt sich in drei Felder. Das erste Diagramm zeigt die durchschnittliche Leistung des Fertigungssystems über den gesamten Messzeitraum. Dabei beträgt die durchschnittliche Leistung des Fertigungssystems ca. 1000 kW. Weiter ist zu erkennen, dass die mechanische Fertigung mit 46 % den höchsten Anteil daran benötigt, gefolgt von der Härterei und Prozesstechnik mit 33 % und der Montage mit 21 %. Bei der ausschließlichen Betrachtung der Zeiten, in denen nach Schichtplan gefertigt wird, erhöht sich die durchschnittliche Gesamtleistung auf ca. 1300 kW wobei die prozentualen Verteilungen in etwa gleichbleiben. Zudem zeigt eine Untersuchung der produktionsfreien Zeiten (nur Wochenende bzw. Freischicht) eine Absenkung der durchschnittlichen Gesamtleistung auf ca. 400 kW. Hervorzuheben ist, dass die Montage, als Bereich mit der geringsten durchschnittlichen Leistung, im regulären Produktionsbetrieb in produktionsfreien Zeiten mit 39 % den Hauptbedarf benötigt. Ein Vergleich der prozentualen Absenkungen der durchschnittlichen Leistungen am Wochenende ergibt, dass die mechanische Fertigung die Leistung im Vergleich zur normalen Produktion um ca. 79 %, die Montage um ca. 46 % und die Härterei und Prozesstechnik um ca. 76 % absenkte.

3.3.3 Ergebnisse Potenzialstudie Bottom-up

Die Potenzialstudie Bottom-up verfolgt mehrere Ziele und untergliedert sich deshalb in verschiedene Bereiche. Zuerst wird auf die Ergebnisse der Lastganganalyse auf Maschinenebene eingegangen, danach folgt eine detailliertere Untersuchung der Komponentenlastgänge. Daran anschließend zeigt eine Unterbrechungsanalyse die Häufigkeitsverteilung entstehender Unterbrechungen im Produktionsprozess, mit deren Hilfe abschließend das theoretische Einsparpotenzial durch einen optimalen Stand-by-Betrieb bestimmt wird.

3.3.3.1 Ergebnisse Lastganganalyse auf Maschinenebene

Die analysierten Prozesse beinhalten Fräs-, Dreh-, Schleif-, Hon-, Räum-, Wasch-, Schweiß- und Umformmaschinen. Deren prozentuale Häufigkeit in der untersuchten Bauteilfertigung zeigt Abbildung 3.9.

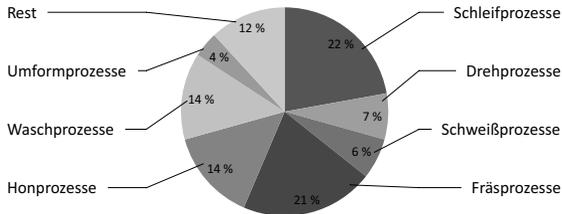


Abbildung 3.9: Prozentuale Prozessverteilung der Bauteilfertigung

Bezogen auf den gesamten Maschinenpark der energetisch relevanten Prozesse, stellen die Schleif- und Fräsmaschinen mit 43 % den größten Anteil dar, gefolgt von den Hon- und Waschmaschinen mit 28 % sowie den Dreh- und Schweißmaschinen mit 10 %. Die Auswertung zeigt, dass ca. 85 % aller eingesetzten Maschinen diesen sechs Prozessen zugeordnet sind. Weitere 15 % entfallen auf Umform-, Bürst-, Richt-, Räum- und Strahlmaschinen.

Die exemplarischen Leistungsverläufe der am häufigsten eingesetzten Maschinen zeigt Abbildung 3.10. Die zeitliche Darstellung ist so gewählt, dass sowohl normale Produktionsphasen als auch Phasen des Bereitschaftsbetriebs enthalten sind. Die Prozesse sind gekennzeichnet durch einen sich periodisch wiederholenden Leistungsverlauf während der Bearbeitung und einem meist annähernd konstanten Leistungsverlauf im Bereitschaftsbetrieb. Eine Ausnahme bilden die Waschprozesse, welche unabhängig von der Produktionslast einen konstanten oder sich zyklisch wiederholenden Leistungsverlauf zeigen. Einen Auszug der Gesamtauswertung zeigt Tabelle 3.3.

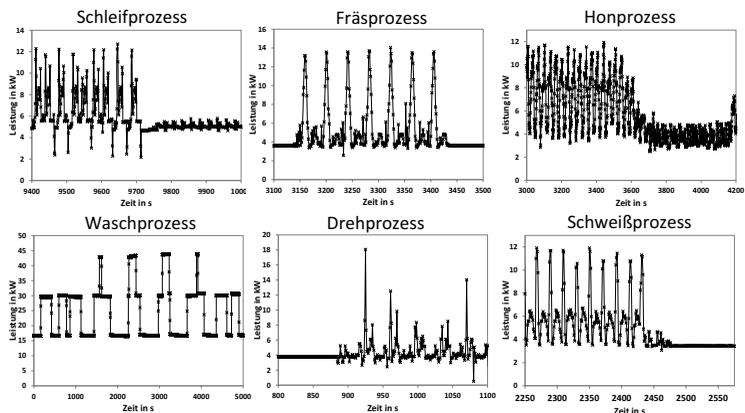


Abbildung 3.10: Exemplarische Leistungsverläufe der Hauptprozesse

Tabelle 3.3: Auszug aus der Auswertung der Maschinenanalyse

Prozess	Ø Leistung arbeitend	Ø Leistung betriebsbereit	Anschlussleistung	max. Leistung	Grundlastanteil	Energiebedarf je Bauteil
Schleifprozess	6,3 kW	5,1 kW	41,0 kW	11,0 kW	80,0 %	58 Wh
Drehprozess	4,7 kW	3,8 kW	30,0 kW	18,0 kW	81,0 %	48 Wh
Fräsprozess	5,2 kW	3,5 kW	48,0 kW	14,0 kW	70,0 %	59 Wh
Honprozess	7,2 kW	4,0 kW	35,0 kW	12,0 kW	54,0 %	60 Wh
Waschprozess	24,1 kW	24,1 kW	51,0 kW	44,0 kW	70,0 %	k.A.
Schweißprozess	5,1 kW	3,5 kW	28,0 kW	11,9 kW	68,0 %	29 Wh

Der überwiegende Anteil aller untersuchten Prozesse weist einen Grundlastanteil zwischen 65 % und 80 % auf. Zudem ist eine starke Diskrepanz zwischen der Anschlussleistung und der maximalen bzw. durchschnittlichen Leistung der Maschine festzustellen. Bezogen auf die durchschnittliche Leistung während der normalen Produktion, liegt die angegebene Anschlussleistung um den Faktor 7- bis 10-mal höher als benötigt. Ein Bezug auf die tatsächlich anfallende Spitzenleistung verringert diesen Wert auf das 1,6 bis 3,5-fache. Die Energiebedarfe zur Herstellung eines Bauteils liegen bei den überwiegenden Prozessen eng beieinander.

Neben der Auswertung der Einzelmaschinen erfolgt zusätzlich eine gruppenspezifische Auswertung. Bei dieser sind alle Maschinen, die hinsichtlich ihres Prozesses und ihrer Fertigungsaufgabe hinreichend übereinstimmen, zu einer Gruppe zusammengefasst. Die einzelnen Gruppen, welche ca. 85 % der Maschinen des Fertigungssystems beinhalten, sind in

Abbildung 3.11 dargestellt. Diese zeigen für die Maschinenzustände *Arbeitend*, *Betriebsbereit* und *Stand-by* die jeweilige durchschnittliche Leistung der energetisch relevanten Maschinen.

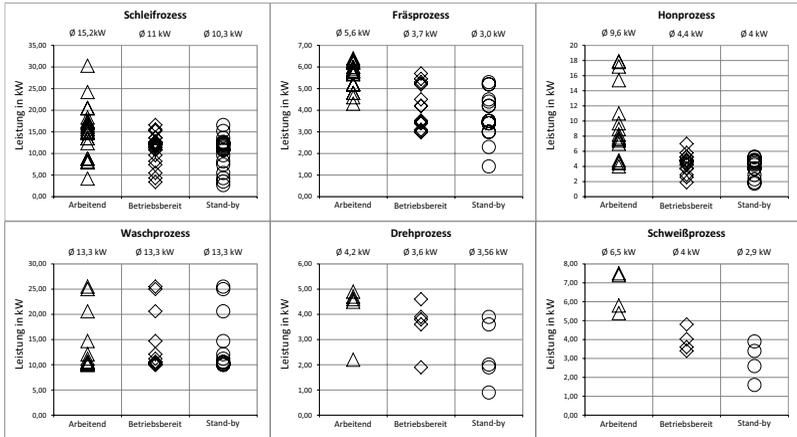


Abbildung 3.11: Durchschnittliche Leistungen der Hauptprozesse

Schleifprozesse

Die Schleifprozesse stellen mit 22 % die größte Maschinengruppe dar. Mit den durchschnittlichen Leistungen von 15 kW, 11 kW und 10 kW in den Maschinenzuständen *Arbeitend*, *Betriebsbereit* und *Stand-by* können diese im Vergleich mit den weiteren Gruppen als energieintensive Maschinen definiert werden. Die durchschnittliche Leistung im Bereitschaftsbetrieb beträgt 72 % im Vergleich zur normalen Produktion. Im Stand-by-Betrieb erfolgt eine weitere Absenkung des Energiebedarfs um 4 % auf ca. 68 %. Eine weitere Reduktion des Energiebedarfs im Stand-by-Betrieb auch bei längeren Unterbrechungen erfolgt i.d.R. nicht.

Honprozesse

Die Honprozesse zeigen eine große Streuung der Leistungsbedarfe während der Bearbeitung. Je nach Bauteil und Maschinenhersteller liegen die erforderlichen durchschnittlichen Leistungen zwischen 5 kW und 18 kW. Im betriebsbereiten Zustand zeigen alle Maschinen eine deutliche Absenkung des Energiebedarfs. Die Leistungsaufnahme liegt bei ca. 45 % der durchschnittlichen Leistung während der Fertigung.

Waschprozesse

Der Leistungsbedarf der Waschprozesse ist i.d.R. unabhängig von der Produktionslast. Die Leistungsaufnahme zeigt in allen Betriebszuständen einen identischen Verlauf. Mit einem Anteil von 14 % am Maschinenpark und einer durchschnittlichen Leistung von ca. 13 kW stellt die Waschtechnik die energieintensivste Gruppe dar.

Fräs-/Dreh-/Schweißprozesse

Die einzelnen Fräs-, Dreh-, und Schweißprozesse zeigen in ihrer Gruppe hinsichtlich des Leistungsbedarfs eine geringe Streuung. Die durchschnittlichen Leistungen liegen je nach Betriebszustand zwischen 5,6 kW und 2,9 kW. Die Energieintensität der Maschinen wird als gering bis mittel eingestuft. Die Leistungsaufnahmen im Bereitschaftsbetrieb liegen im Bezug zur Produktion zwischen 55 % und 85 %.

3.3.3.2 Ergebnisse Lastganganalyse auf Komponentenebene

Durch eine Analyse der Leistungsverläufe einzelner Maschinenkomponenten, in Abhängigkeit des aktuellen Betriebszustands, ist es möglich, Rückschlüsse auf die Betriebs- und Prozessführung zu erhalten und diese ggf. zu optimieren. Die Praxis zeigt jedoch, dass viele Maschinenhersteller nur sehr begrenzte Informationen bezüglich des Energie- und Medienbedarfs ihrer Maschinen und Anlagen besitzen. Liegen Informationen vor, beziehen sich diese meist auf die Gesamtleistung der Maschine. Eine differenzierte Zuordnung des Energiebedarfs auf einzelne Komponenten erfolgt i.d.R. nicht.

Für eine detaillierte Untersuchung der einzelnen Maschinen erfolgt die zeitgleiche energetische Vermessung relevanter Maschinenkomponenten bei unterschiedlichen Maschinenzuständen. Die Messstellendefinition erfolgt anhand der Anschlussleistungen der verbauten Komponenten sowie deren zu erwartender Betriebsweise.

Exemplarische Lastganganwertung

Für eine untersuchte Fräsmaschine zeigt Abbildung 3.12 exemplarisch die Lastverläufe der einzelnen Maschinenkomponenten. Die Maschinenzustände *Arbeitend*, *Betriebsbereit*, *Stand-by* und *Hochlauf* sind als Standardprogramme in der Maschinensteuerung hinterlegt. Der zusätzliche Stand-by²-Betrieb wurde durch manuelles Abschalten einzelner Komponenten über die Maschinenschnittstelle eingeleitet.

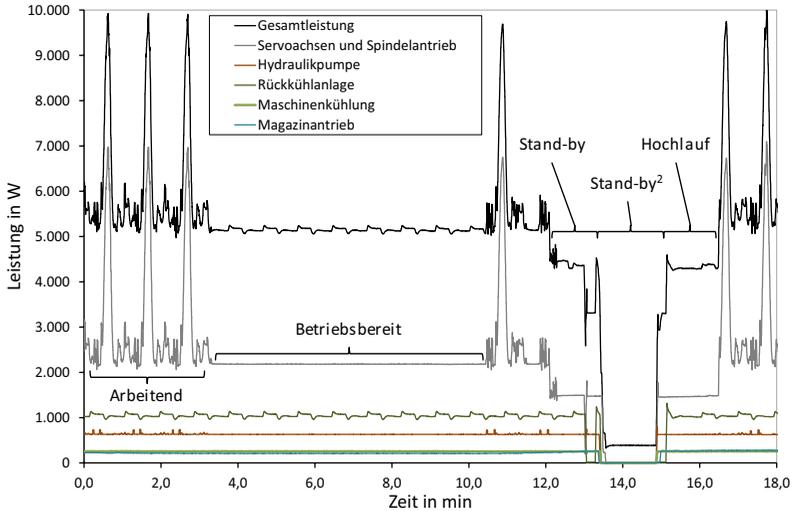


Abbildung 3.12: Leistungsverlauf einzelner Komponenten einer Fräsmaschine

Die Rückkühlanlage, die Maschinenkühlung, die Hydraulikpumpe und der Magazintrieb sind in allen Standardprogrammen der Maschinensteuerung durchgehend eingeschaltet. Die einzelnen Leistungsaufnahmen zeigen einen konstanten bzw. sich periodisch wiederholenden Leistungsverlauf, welcher unabhängig vom formgebenden Prozessschritt ist.

Die Leistungsaufnahmen der Servoachsen und Spindeltriebe sind maßgeblich vom Betriebszustand der Maschine bestimmt. Während der Bearbeitung eines Bauteils befinden sich sowohl die Servoachsen als auch der Spindeltrieb im Eingriff. Liegt kein Bauteil zur Bearbeitung vor, verringert sich die Leistungsaufnahme um die Anteile der Servoachsen und den Anteil zur Spanabnahme. Die Hauptspindel mit dem Werkzeug wird weiterhin angetrieben.

Im Stand-by-Betrieb wird nur eine geringe Reduktion der Leistungsaufnahme erreicht. Es erfolgt lediglich eine Absenkung der Drehzahl der Hauptspindel. Alle weiteren Maschinenkomponenten werden unverändert betrieben. Der Stand-by²-Betrieb zeigt die technischen Möglichkeiten der Maschine, welche aktuell jedoch nicht genutzt werden. Bei längeren Maschinenstillständen ist es möglich, alle energetisch relevanten Komponenten abzuschalten. Der anschließende Wiederanlauf der Maschine erfolgt fast unmittelbar. Die dargestellte Hochlaufzeit beinhaltet sowohl den Teiletransport zum Werkzeug als auch das Erreichen eines betriebsbereiten Zustands aller einzelnen Komponenten. Die mögliche Hochlaufzeit für den dargestellten Prozess beträgt ca. 1-2 Minuten.

Zusammenfassende Auswertung der Hauptprozesse

Die folgenden Abbildungen zeigen eine verkürzte Auswertung der einzelnen Lastganganalysen. Untersucht wurden verschiedene Schleif-, Hon-, Wasch-, Dreh-, Fräs- und Umformprozesse. Die dargestellten Auswertungen sind maschinenspezifisch und nicht als allgemeingültig anzusehen.

Schleifprozess

Die Leistungsbedarfe der untersuchten Schleifmaschinen sind im Wesentlichen durch die Achsantriebe und Schleifspindeln sowie durch die Kühlschmierstoff- und Hydrauliksysteme bestimmt (vgl. Abbildung 3.13).

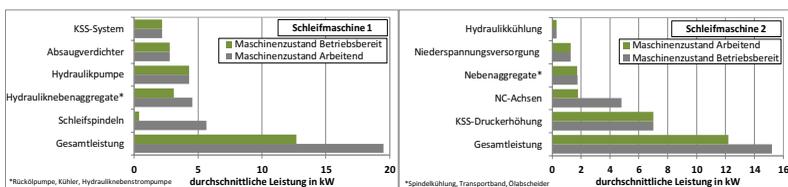


Abbildung 3.13: Komponentennmessung einer Schleif- und Fräsmaschine

Im betriebsbereiten Zustand erfolgt eine Verringerung der Leistungsaufnahme der Achs- und Spindelantriebe: die Hydraulik- und Kühlschmierstoffsysteme werden weiterhin unverändert betrieben. Schleifprozesse werden häufig zur Herstellung der Endkontur eines Bauteils eingesetzt. Dies bedingt hohe Anforderungen an die Fertigungstoleranzen. Temperaturänderungen und inhomogene Temperaturverläufe des Maschinenbettes, hervorgerufen durch eine veränderte Betriebsweise der Nebenaggregate, können zu Qualitätsproblemen führen. Ein Stand-by-Betrieb existiert deshalb meist nicht bzw. wird nur bei sehr langen Produktionsunterbrechungen eingenommen.

Honprozess

Die Regel- bzw. Servoantriebe und die Bereitstellung des erforderlichen Honöls kennzeichnen die Leistungsbedarfe der Honprozesse. Zudem zeigen diese im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren eine relativ geringe Leistungsaufnahme in unproduktiven Phasen (vgl. Abbildung 3.14).

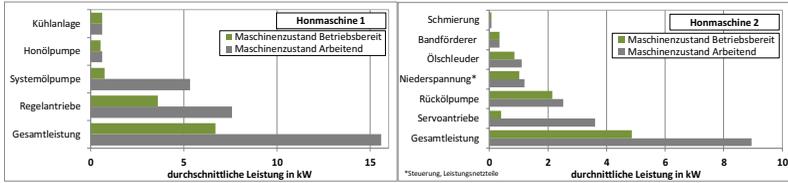


Abbildung 3.14: Komponentenmessungen von Honmaschinen

Die reduzierte Leistungsaufnahme im Bereitschaftsbetrieb ist sowohl auf eine Verringerung der benötigten Antriebsleistung der Regelantriebe als auch auf die Absenkung des Drucks und des Durchflusses der Honölsysteme zurückzuführen. Die Honmaschine 1 reduziert die Leistungsaufnahme der Systemölpumpe um ca. 85 % und die der Regelantriebe um ca. 50 %. Die Honmaschine 2 zeigt ein umgekehrtes Bild. Die Servoantriebe benötigen annähernd keine Leistung, wobei die Pumpen des Honölsystems eine fast unveränderte Leistungsaufnahme zeigen.

Waschprozesse

Waschprozesse befinden sich meist am Ende einer Produktionslinie und entfernen Späne und Kühlschmierstoffreste von den Bauteilen. Der Waschprozess erfolgt meist im Durchlaufverfahren, wobei die Bauteile mit einer warmen oder kalten Waschlauge gereinigt werden. Um Rostbildung zu vermeiden, findet neben dem eigentlichen Waschprozess ein nachgelagerter Trocknungsvorgang statt. Der beschriebene Trocknungsvorgang benötigt mit dem Trocknungsgebläse und dem Luftheritzer den Hauptteil der zum Betrieb der Maschine nötigen Leistung (vgl. Abbildung 3.15). Weitere energetisch relevante Komponenten sind die Absaugpumpe, welche die Waschlauge befördert sowie der Schwadenkondensator.

Die untersuchten Waschmaschinen zeigen meist einen vom Betriebszustand der Waschmaschine unabhängigen Leistungsbedarf. Es erfolgt keine Reduktion der Leistungsaufnahme in unproduktiven Phasen. Auch ist keine Differenzierung verschiedener Maschinenzustände möglich.

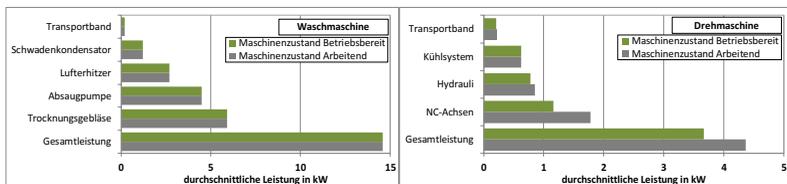


Abbildung 3.15: Komponentenmessungen einer Wasch- und Drehmaschine

Drehprozess

Der Leistungsbedarf der Drehmaschine ist im Wesentlichen auf die benötigten Antriebsleistungen der NC-Achsen sowie des Hydraulik- und Kühlsystems zurückzuführen (vgl. Abbildung 3.15). Die Leistungsabsenkung im betriebsbereiten Zustand erfolgt allein durch die verringerte Antriebsleistung der NC-Achsen. Das Hydraulik- und Kühlsystem werden weiterhin bei einer konstanten Leistungsaufnahme betrieben. Ein Stand-by-Betrieb wird i.d.R. nicht eingeleitet.

Umformprozess

Abbildung 3.16 zeigt die durchschnittlichen Leistungsaufnahmen der einzelnen Komponenten einer hydraulischen Umformmaschine. Mit einer Gesamtleistung von ca. 38 kW im arbeitenden Zustand zählt die Maschine zu den energieintensivsten Werkzeugmaschinen der Bauteilfertigung. Bemerkenswert ist, dass die Leistungsaufnahme ausschließlich durch die Hydraulikpumpe dominiert wird. In unproduktiven Phasen wird der durch Leckagen verursachte Druckverlust des hydraulischen Umformsystems durch das zyklische Füllen eines Ladedruckspeichers aufrechterhalten. Die dafür benötigte Leistung beträgt durchschnittlich 15 kW.

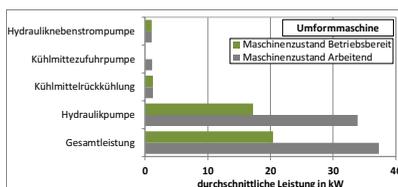


Abbildung 3.16: Komponentenmessung einer Umformmaschine

3.3.3.3 Ergebnisse der Unterbrechungsanalyse

Die Unterbrechungsanalyse untersucht die einzelnen Linien des Fertigungssystems hinsichtlich geplanter und ungeplanter Maschinenstillstände sowie deren zeitlicher Dauer und Häufigkeit. Der Fokus liegt auf der Detektion von Unterbrechungen, welche durch organisatorische Probleme auftreten. Dazu erfolgt die Datenaufnahme an 13 ausgewählten Einzelmaschinen, welche sich jeweils am Kopf der Produktionslinien befinden und somit von evtl. Engpässen bei der Teileversorgung unmittelbar betroffen sind. Die Maschinen werden im Drei-Schicht-Betrieb mit 17 Schichten in der Woche betrieben.

Bezogen auf die Gesamtzahl der eintretenden Pausen zeigt Abbildung 3.17 für jede untersuchte Maschine die relative Häufigkeitsverteilung. Die Unterbrechungen werden in Abhängigkeit ihrer

Länge zu Gruppen zusammengefasst, bei denen der Gültigkeitsbereich mit zunehmender Dauer vergrößert wird. Die auftretenden Maschinenstillstände sind überwiegend organisatorisch durch vorherrschenden Teilemangel bedingt. Rüstvorgänge und Instandsetzungsarbeiten spielen eine untergeordnete Rolle, da diese meist zum Schichtbeginn oder in Freischichten erfolgen. Auch länger anhaltende Maschinenstörungen können als Ausnahme angesehen werden. Auf Grundlage der vorangegangenen Lastgangvermessung auf Komponentenebene erfolgt eine erste Einschätzung zu möglichen energetischen Einsparpotenzialen mithilfe eines optimierten Stand-by-Betriebs.

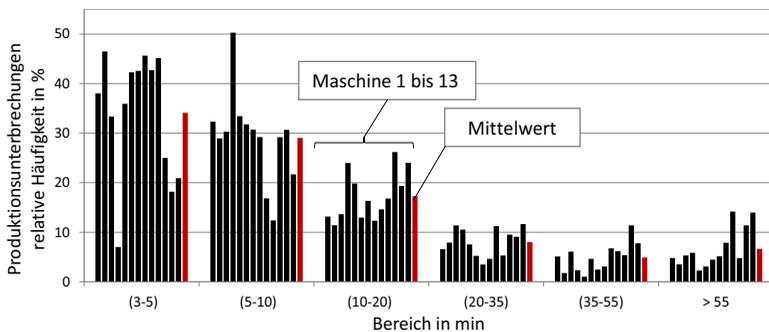


Abbildung 3.17: Relative Häufigkeitsverteilung von Unterbrechungen im Produktionsablauf

Es ist ersichtlich, dass ca. 34 % aller entstehenden Unterbrechungen nur sehr kurz zwischen drei und fünf Minuten vorliegen. Die Nutzung dieser Pausen für einen wirtschaftlichen Stand-by-Betrieb wird aufgrund der Kürze als schwer eingeschätzt. Der Bereich zwischen fünf und zehn Minuten umfasst ca. 28 % aller entstehenden Pausen. Es ist davon auszugehen, dass diese Zeiten für einen Stand-by-Betrieb im Bereich der Dreh-, Fräs-, Umform- und Waschprozesse teilweise genutzt werden können. Gleiches gilt für die Pausen im Bereich zwischen zehn und zwanzig Minuten, wobei diese einen Anteil von 18 % darstellen. Ab einer Pause von zwanzig Minuten ist davon auszugehen, dass auch die Hon- und Schleifprozesse diese für einen Stand-by-Betrieb nutzen können. Die Auswertung zeigt zudem, dass auch lange Unterbrechungen signifikante Häufigkeiten zeigen. Der Anteil der Pausen im Bereich zwischen 20 -35 Minuten liegt bei ca. 8 %, zwischen 35 -55 Minuten bei 5 % und größer 55 Minuten bei 7 %.

Das energetische Einsparpotenzial ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Pausenzeit. Deshalb ist neben der Anzahl bzw. der Häufigkeitsverteilung der Unterbrechungen entscheidend,

wie groß der zeitliche Anteil der einzelnen Gruppen bezogen auf die gesamte Unterbrechungsdauer ist. In Abbildung 3.18 ist dieser Zusammenhang dargestellt.

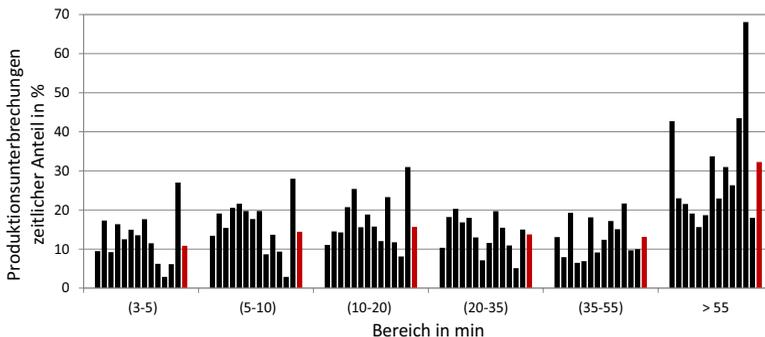


Abbildung 3.18: Zeitlicher Anteil an Produktionsunterbrechungen

Die meisten Unterbrechungen treten in der Gruppe mit Pausen zwischen 3 Minuten und 5 Minuten auf (vgl. Abbildung 3.17). Diese Gruppe besitzt, bezogen auf die Gesamtdauer, jedoch nur einen zeitlichen Anteil von ca. 10 %. Im Gegensatz dazu entfällt über 30 % der gesamten Unterbrechungszeit auf Pausen mit einer Länge größer 55 Minuten, welche mit nur ca. 7 % relativ selten auftreten. Die zeitliche Dauer der anderen Gruppen ist annähernd identisch und liegt bei ca. 15 %.

Die zeitliche Gesamtdauer auftretender Unterbrechungen liegt bezogen auf die gesamte zur Verfügung stehenden Arbeitszeit, je nach untersuchter Produktionslinie zwischen 25 %-35 %.

Eine tiefere Analyse über mögliche Abschaltstrategien und Stand-by-Betriebsweisen der Einzelmaschinen erfolgt im Kapitel 4.6.

3.3.4 Potenzialstudie Stand-by-Betrieb

Mithilfe der Potenzialstudie wird bewertet, wie hoch das theoretische energetische Einsparpotenzial durch einen idealen Stand-by-Betrieb ist. Es gelten die Annahmen, dass alle unproduktiven Zeiten für einen Stand-by-Betrieb genutzt werden können und dass die Maschinen in diesem Zeitraum keinen Energie- und Medienbedarf aufweisen.

Die untersuchte Bauteilfertigung stellt ein aktuelles, nach dem Stand der Technik aufgebautes Fertigungssystem dar und wird deshalb als Referenzsystem für die folgenden Untersuchungen gewählt.

Die Potenzialstudie erfolgt anhand der dem Fertigungssystem zugeordneten Produktions- und Energieparameter. Die sensitiven Einflussfaktoren der Potenzialstudie sind:

- Die Takt- und Prozesszeiten jeder Maschine des Fertigungssystems
- Die Leistungsbedarfe jeder Maschine des Fertigungssystems je Betriebszustand
- Die Teileanzahl jedes zu fertigenden Bauteiltyps je Schicht
- Die Anzahl der Schichten und deren zeitliche Einteilung

Parameter der Potenzialstudie

Die Potenzialstudie erfolgt am Beispiel des Referenzfertigungssystems, welches im Drei-Schicht-Betrieb mit 17 Schichten pro Woche betrieben wird. Alle 142 Maschinen des Fertigungssystems sind bezüglich der energetischen- und produktionspezifischen Parameter abgebildet und dienen als Berechnungsgrundlage. Die Dauer einer Schicht beträgt 8 Stunden und beinhaltet drei Pausen, welche den Fertigungsprozess jedoch nicht beeinträchtigen. Die vier möglichen Freischichten erfolgen am Stück am Ende der Woche. Das Fertigungssystem ist auf eine Kapazität von 533 Bauteile je Schicht ausgelegt. Gefertigt werden 16 Bauteiltypen auf 11 Fertigungslinien. Die Energiedaten der einzelnen Maschinen sind der vorangegangenen Lastganganalyse entnommen.

3.3.4.1 Ergebnisse Potenzialstudie

Anhand der Taktzeiten sowie der Bauteilmenge wird für jeden Prozess die minimal benötigte Bearbeitungszeit bestimmt. Es gelten die Annahmen, dass die Maschine unterbrechungsfrei mit Bauteilen versorgt wird und keine Störungen und Rüstvorgänge auftreten. Die so ermittelte Bearbeitungszeit stellt den idealen Prozessablauf dar. Ausgehend davon wird, anhand der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit, die Leerlaufzeit ermittelt, welche theoretisch für einen Stand-by-Betrieb genutzt werden kann. Die untersuchten Prozesse benötigen durchschnittlich 56 % der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit für die Fertigung der erforderlichen Stückzahl. In Abhängigkeit der Taktzeiten der unterschiedlichen Prozesse variiert das Verhältnis prozess- und maschinenspezifisch zwischen 37 % und 92 %.

Die Lastganguntersuchung zeigt, dass annähernd alle betrachteten Maschinen in produktionsfreien Phasen keinen Stand-by-Betrieb einnehmen. Deshalb wird als theoretisches Einsparpotenzial die mögliche Reduzierung um die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Zustand *Betriebsbereit* herangezogen. Der Gesamtenergiebedarf jedes einzelnen Prozesses berechnet sich demnach aus den spezifischen Leistungen für die Zustände *Arbeitend* und *Betriebsbereit* und den zugehörigen Bearbeitungs- und Leerlaufzeiten.

Die durchschnittliche Leistungsaufnahme des Fertigungssystems im betriebsbereiten Zustand beträgt ca. 70 % im Vergleich zur Leistungsaufnahme während des Fertigungsprozesses. Unter Einbeziehung der prozessspezifischen Taktzeiten und den verschiedenen Leerlaufzeiten der einzelnen Maschinen ergibt sich der Anteil des Energiebedarfs in nicht wertschöpfenden Zeiten, bezogen auf den Gesamtbedarf, zu 44 %. Durch das Einbeziehen eines durchschnittlichen Rüstanteils von 4 % (Literaturwert für Großserienfertigungen, (vgl. Bittencourt 2013, S. 101)), bezogen auf die zur Verfügung stehende Arbeitszeit sowie einer durchschnittlichen Maschinenverfügbarkeit von 97 %, verringert sich das theoretische energetische Einsparpotenzial auf 38,5 %.

Zu beachten ist, dass das theoretische energetische Einsparpotenzial keine technischen Aspekte berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, dass das wirtschaftliche und technische Potenzial deutlich geringer ausfällt. So ist anzunehmen, dass bedingt durch prozess- und maschinenspezifische Restriktionen nur ein bestimmter Anteil der zur Verfügung stehenden Pausen für einen Stand-by-Betrieb genutzt werden kann. Eine detaillierte Potenzialstudie, die diese Aspekte berücksichtigt, erfolgt in Kapitel 6.

Entwicklung eines Stand-by-Managers

Die in Kapitel 3 erhobene Potenzialstudie zeigt, dass theoretisch erhebliche energetische Einsparungen durch einen optimierten Stand-by-Betrieb erzielt werden können. Das größte Potenzial wird derzeit in dem Bereich der Fertigungsprozesse gesehen. Dieses Kapitel beschäftigt sich deshalb mit der Entwicklung eines Stand-by-Managers, welcher als Leitsystem arbeitend, jeden einzelnen Prozess einer vollverketteten Fertigung dazu befähigt, in unproduktiven Zeiten einen energetisch günstigen Betriebszustand einzunehmen. Die Entwicklung des Stand-by-Manager Prototyps erfolgt in Anlehnung an ein ausgewähltes Referenzfertigungssystem.

4.1 Referenzsystem

Für die Funktionsentwicklung ist entscheidend, welche Daten und Informationen in welcher Güte vorliegen bzw. nutzbar gemacht werden können. Zudem ist ein umfangreiches Systemverständnis nötig. In Anlehnung an ein untersuchtes Referenzfertigungssystem, welches vereinfacht in Abbildung 4.1 dargestellt ist, erfolgt die Beschreibung der Fertigungssteuerung einer aktuellen vollverketteten Produktion.

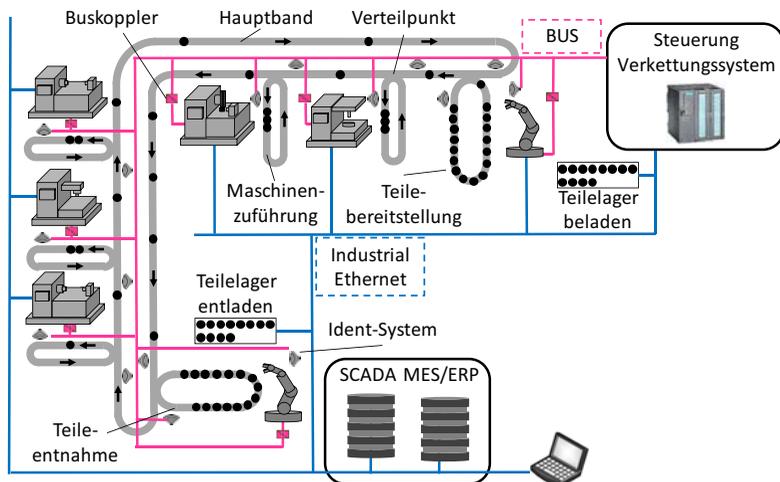


Abbildung 4.1: Referenzfertigungssystem zur Entwicklung des Stand-by-Managers

Die Beladung des Fertigungssystems erfolgt über einen Roboter am Kopf der Linie. Über ein Transfersystem gelangen die einzelnen Bauteile zu den Fertigungsprozessen. Die Materialflusssteuerung übernimmt die Verkettungssteuerung, welche mithilfe verbauter Ident-Systeme die Bauteile den passenden Fertigungsprozessen in der richtigen Arbeitsfolge zuweist. Alle Maschinen, Transfersysteme, Roboter und Teilelager sind an ein MES bzw. ERP-System angeschlossen. Zusätzlich ist das Busnetz der Verkettungssteuerung über Buskoppler mit den Busnetzen der Maschinen für einen Datenaustausch gekoppelt. Am Ende der Linie entnimmt ein Roboter die fertigen Bauteile und überführt sie in ein Lager.

Bei dem Transfersystem handelt es sich um ein Kettenfördersystem, welches aus mehreren Segmenten besteht. Über das Transfersystem erfolgt die Beförderung und Verteilung der Bauteile zu den Maschinen. Die Bauteile werden als Rohteil auf einem Werkstückträger platziert. Dieser befindet sich lose auf der Förderkette und wird ausschließlich durch Haftreibung bewegt. Die Werkstückträger sind staufähig und besitzen einen RFID-Chip, auf welchem bauteilspezifische Informationen wie z.B. der Bauteiltyp, die Seriennummer und die Arbeitsfolge hinterlegt sind. Anhand dieser Informationen erfolgt die Materialflusssteuerung. Dazu wird an jedem Verteilpunkt der aktuelle Werkstückträger gestoppt und die Identifikationsinformationen von der Verkettungssteuerung des Transfersystems abgefragt. In Abhängigkeit der Arbeitsfolge erfolgt die Einschleusung zu der Maschine oder die Weiterleitung an den nächsten Verteilpunkt. Gelangt ein Bauteil zu einer Maschine, wird es dort vom Werkstückträger entnommen, bearbeitet und nach

dem Bearbeitungsprozess wieder auf einen Werkstückträger platziert. Da in der Regel über den gesamten Fertigungsprozess mehrere Fertigungsschritte durchlaufen werden, kommt es zu einem Wechsel aus der Kombination von Werkstückträger und Bauteil. Deshalb werden vor jedem Fertigungsschritt die bauteilspezifischen Daten des Werkstückträgers zwischengespeichert, maschinenintern dem Bauteil zugeordnet und bei der Beladung des Werkstückträgers nach dem Bearbeitungsprozess auf den RFID-Chip des neuen Werkstückträgers geschrieben. So kann eine lückenlose Verfolgung des Bauteils in der Fertigungslinie sichergestellt werden. Das Identifikationssystem liefert an jedem Verteilpunkt und an jeder Maschine Informationen über die aktuelle Position und den aktuellen Zielort des Bauteils. Durch diese Informationen kann in zeitdiskreten Intervallen der Materialfluss des Fertigungssystems berechnet werden. Die Verknüpfung der Einzelsysteme erfolgt mithilfe der Informationen, die von einem MES-System erhoben werden. Diese sind qualitäts- und produktionssteuerungsrelevante Daten, welche eine Rückverfolgbarkeit der Bauteile und somit die Abbildung des systemübergreifenden Materialflusses ermöglichen.

4.2 Konzeptbeschreibung

Die aktuelle Maschinengeneration ist technisch ohne Weiteres in der Lage, einen Stand-by-Betrieb einzunehmen oder auch einzelne Komponenten in unproduktiven Phasen auszustellen oder zu drosseln. Dennoch ist zu beobachten, dass diese Funktionen kaum genutzt werden. Die wichtigste Entscheidungsgröße zur Einleitung eines wirtschaftlich sinnvollen Stand-by-Betriebs ist die zur Verfügung stehende Zeit der unproduktiven Phase (Pause). Diese ist jedoch nicht exakt bekannt, sodass die Maschine überwiegend in einem betriebsbereiten Zustand verbleibt. Ob es zu einer Unterbrechung im Produktionsablauf kommt, hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab. Diese Faktoren können in geplante und ungeplante Events unterteilt werden. Geplante Events (z.B. Pausen, Freischichten, Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten) sind festgelegt, terminierbar und einfach zu berechnen. Ungeplante Events (z.B. Störungen oder kurzzeitiger Teilemangel) sind nicht terminierbar und schwierig zu prognostizieren und zu berechnen. Die wesentliche Herausforderung bei der Ermittlung der geplanten und ungeplanten Pausenzeiten besteht in der automatisierten Verarbeitung und Auswertung bestehender Daten. Der Stand-by-Manager nutzt bereits vorhandene Produktionsdaten, verknüpft diese in Echtzeit, generiert die benötigten Informationen und kommuniziert mit den Maschinen. Abbildung 4.2 zeigt das Konzept, wie anhand bestehender Daten die Pausenzeit für jede Maschine im Fertigungssystem berechnet und übergeben wird.

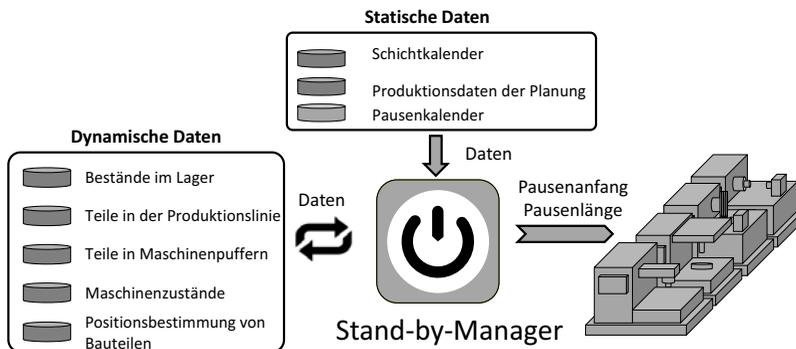


Abbildung 4.2: Konzeptbeschreibung des Stand-by-Managers

Die zur Verfügung stehenden Informationen können in statische und dynamische Daten unterteilt werden. Die statischen Daten unterliegen in der Regel keiner Änderung und sind meist Produktionsplanungsdaten, welche die Anzahl der zu produzierenden Stückzahlen festlegen und die Schicht- und die Pauseneinteilung definieren. Rein statische Daten sind nicht geeignet, um die Pausenzeiten zu berechnen, da der reale Produktionsablauf meist von dem geplanten Zustand abweicht. Dynamische Daten unterliegen einer ständigen Änderung und werden kontinuierlich aktualisiert. Mithilfe der dynamischen Daten ist es möglich, Unterbrechungen, Störungen und Engpässe im Produktionsablauf zu berechnen und zu prognostizieren. Entscheidend ist es, für jede Maschine zu jedem Zeitpunkt berechnen zu können, wann das nächste Bauteil für die Bearbeitung bereitsteht. Um dies zu erreichen, werden die dynamischen Daten aus verschiedenen Systemen gewonnen und miteinander verknüpft. Informationen über den Zeitpunkt der Anlieferung von Rohmaterialien sowie die aktuellen Lagerbestände können aus den MES- und ERP-Systemen erhoben werden. Informationen über den aktuellen Materialfluss werden aus Daten des Transfersystems berechnet. Betriebszustände und maschinenspezifische Informationen werden mithilfe einer Schnittstelle der Maschinensteuerung entnommen. Das aus diesen Informationen berechnete Zeitsignal wird anschließend jeder Maschinensteuerung übergeben. Diese entscheidet selbstständig anhand der zeitlichen Informationen, ob ein Stand-by-Betrieb eingeleitet wird und welche Komponenten gedrosselt oder inaktiv gesetzt werden. Der Stand-by-Manager ist ein Informationssystem, welches der Maschine nur eine zusätzliche Information bereitstellt. Die Entscheidung, ob die Maschine die zur Verfügung stehende Zeit für einen Stand-by-Betrieb nutzt, bleibt der Maschinensteuerung vorbehalten.

4.2.1 Funktionsprinzip

Der Zeitpunkt, wann ein Bauteil an seinem Bestimmungsort eintrifft, ist im Wesentlichen von der Entfernung zu diesem und den während des Transports auftretenden Unterbrechungen bestimmt. Ist die Zeit bekannt, wann ein Bauteil an seinem Ziel eintrifft, kann die Zeitspanne optimal genutzt werden, um die Maschine in einen energetisch günstigen Stand-by-Modus zu versetzen. Im einfachsten Fall entspricht die Ankunftszeit eines Bauteils gleich dem Quotienten aus der Entfernung und der Geschwindigkeit, mit der sich das Bauteil bewegt. Abbildung 4.3 zeigt die grundlegende Berechnungsmethode für die Ankunftszeit eines Bauteils an seinem Zielort eines ungestörten Teiletransportes.

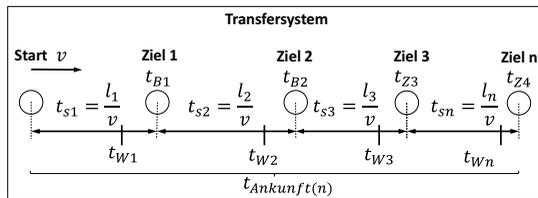


Abbildung 4.3: Grundlogik des Stand-by-Managers

Die Berechnung der Ankunftszeit ($t_{Ankunft}$) ergibt sich aus der Summe der Streckenabschnittszeiten (t_s), der Streckenwartezeiten (t_W) und den Bearbeitungszeiten der Zwischenziele (t_B).

$$t_{Ankunft(n)} = \sum_1^n t_{sn} + t_{Wn} + t_{B(n-1)} \quad (4.1)$$

Die Streckenabschnittszeiten berücksichtigen ausschließlich die geometrischen Abmessungen und die Transportgeschwindigkeiten des Fertigungssystems. Die Streckenwartezeiten beinhalten hingegen alle auf der Transportstrecke auftretenden Unterbrechungen im Materialfluss. Die Zeit, die sich ein Bauteil in der Maschine befindet, wird als Bearbeitungszeit definiert und stellt meist die Taktzeit des Bearbeitungsprozesses dar. Die Summe aller Zeiten bestimmt die Ankunftszeit.

Die Berechnung der Ankunftszeit erfolgt für jedes sich im Fertigungssystem befindende Bauteil. Für einen ungestörten Teiletransport im Materialflusssystem lässt sich so für jedes Bauteil ermitteln, wann es an welcher Maschine eintrifft. Typischerweise befinden sich in einem Transfersystem für jede Maschine mehrere zu bearbeitende Bauteile. Diese werden unpriorisiert in Abhängigkeit des Eintreffzeitpunktes bearbeitet. Dabei gilt, dass das Bauteil, welches als erstes

bei der Maschine eintrifft, auch als erstes bearbeitet wird. Für die Maschine ist nur die Information notwendig, wann das nächste Bauteil eintrifft. Im Idealfall stellt diese Zeit die Taktzeit der Maschine dar. Das bedeutet, die Maschine ist immer mit Bauteilen versorgt und diese werden Just-in-Time bereitgestellt. In der Praxis erfolgt jedoch meist das Puffern von Bauteilen vor der Anlage, um einen kontinuierlichen Arbeitsprozess aufrecht zu erhalten.

Die beschriebene Methode gilt für den linieninternen Materialfluss eines aus einer Produktionslinie bestehenden Fertigungssystems. Häufig bestehen Fertigungssysteme jedoch aus mehreren entkoppelten Einzelsystemen (vgl. Abbildung 4.4), sodass für die Berechnung der Ankunftszeit ein Datenaustausch zwischen den Teilsystemen notwendig ist.

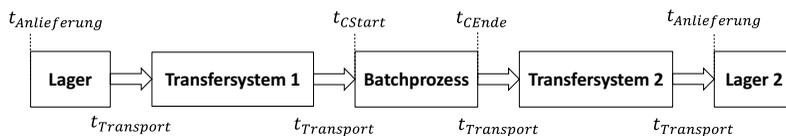


Abbildung 4.4: Aufbau eines entkoppelten Fertigungssystems

So kann es passieren, dass sich Störungen in vorgelagerten Systemen auf alle nachgelegenen Systeme auswirken. Um diese Effekte zu berücksichtigen, werden Informationen über Zustände ausgetauscht, die sich direkt auf die nachgelagerten Einzelsysteme auswirken. Aus den Lager- und Logistiksystemen wird beispielsweise entnommen, wie voll ein Lager ist und wann es das nächste Mal aufgefüllt wird. Kommt es zu einem Engpass in der Materialversorgung, wird die Anlieferungszeit den Folgesystemen übergeben. Die gleiche Vorgehensweise erfolgt für alle im Zusammenhang stehenden Einzelsysteme.

4.2.2 Funktionsbeschreibung

Das in der Konzeptbeschreibung vorgestellte Funktionsprinzip stellt nur die Grundfunktion des Stand-by-Managers dar. Das anschließende Unterkapitel beschreibt die Funktionen des entwickelten Prototyps. Abbildung 4.5 zeigt die Übersicht der entwickelten Funktionen des Stand-by-Managers.

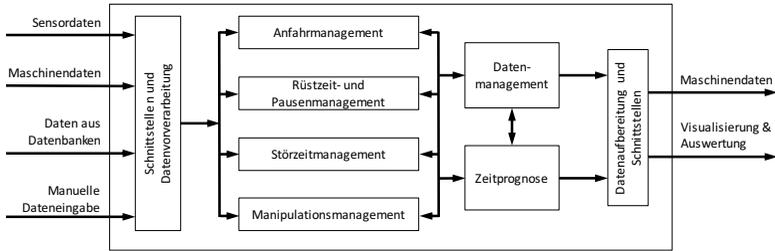


Abbildung 4.5: Funktionen des Stand-by-Managers

Schnittstellen und Datenvorverarbeitung

Die benötigten Inputdaten werden über verschiedene Schnittstellen aus verschiedenen Systemen abgerufen und vorverarbeitet. In der Datenvorverarbeitung erfolgen die Zuordnung der Datenströme zu den einzelnen Teilfunktionen sowie die Aufbereitung und Umwandlung der Datenformate.

Anfahrmanagement

Der Stand-by-Manager benötigt für eine fehlerfreie Funktion konsistente Daten. Liegen diese nicht vor, muss dies erkannt werden und eine Initialisierungsphase beginnen. In der Initialisierungsphase erfolgt das Einlernen des aktuellen Materialflusses, mit welchem später die Ankunftszeiten berechnet werden. Die Initialisierungsphase startet mit Programmstart, wird aber je nach Bedarf im Programmablauf wiederholt. Eine Initialisierungsphase tritt auf, wenn Datenquellen keine oder unplausible Informationen liefern. Dies ist z.B. der Fall, wenn Datenbanken aus Wartungsgründen nicht erreichbar sind oder ein hardwareseitiger Defekt im Bereich der Sensortechnik auftritt. In der Initialisierungsphase erfolgt ein Abgleich zwischen den im Datenmanagement gespeicherten Erwartungsereignissen mit den aktuell auftretenden Ereignissen. Besteht kein kausaler Zusammenhang zwischen diesen Informationen, erfolgt die Löschung des Datensatzes.

Rüstzeit-, Pausen- und Störzeitmanagement

Eine zentrale Bedeutung bei der Berechnung der Ankunftszeiten haben geplante und ungeplante Stillstände einzelner Maschinen. In der Regel wirken sich diese Zeiten auf alle nachgelagerten Prozesse aus. Werden für die Berechnung zu lange Rüstzeiten, Pausen und Störzeiten angenommen, kann es zu einer Verringerung der Ausbringung des gesamten Fertigungssystems kommen. Prozesse befinden sich dann evtl. noch in einem Stand-by-Betrieb oder in der Hochlaufphase, wenn bereits wieder Bauteile für die Bearbeitung bereitstehen. Deshalb ist eine

sehr exakte Bestimmung der Rüstzeiten, Pausen und Störzeiten erforderlich. Meist ist eine exakte Bestimmung nicht möglich bzw. liegt die zeitliche Unterbrechung in einem Erwartungsbereich. Der Stand-by-Manager unterscheidet bei der Berechnung folgende Fälle:

- Die exakte Länge der Unterbrechung ist bekannt
- Die minimale Länge der Unterbrechung ist bekannt
- Die Länge der Unterbrechung ist unbekannt, liegt aber in einem Erwartungsbereich
- Die Länge der Unterbrechung ist unbekannt

Eine exakt bestimmbare Unterbrechung ist als konstanter Wert in die Berechnung des Stand-by-Managers integrierbar. Dieser Fall liegt z.B. vor, wenn Freischichten vorgesehen sind, so dass der Produktionsstart zeitlich definiert ist. Auch bei einer Unterbrechung durch Teilmangel, z.B. hervorgerufen durch eine verspätete Anlieferung von Rohteilen, kann eine exakte Termination des Ereignisses erfolgen. Je nach Organisationsstruktur können auch geplante Pausen exakt definierbare Ereignisse darstellen. So kann beispielsweise der Zeitpunkt, ab wann und wie lange der Mitarbeiter keine Bauteile auf das Transfersystem befördert, bekannt sein. Dennoch ist anzumerken, dass die Praxis zeigt, dass aufgrund von Verschiebung in den organisatorischen Abläufen, eine geplante Pause meist nicht hinreichend genau bestimmbar ist.

Alle Tätigkeiten an denen ein Mitarbeiter beteiligt ist, unterliegen zeitlichen Schwankungen. Dies kann sowohl an unterschiedlichen Arbeitsgeschwindigkeiten der einzelnen Mitarbeiter, als auch an dem aktuellen vorherrschenden Arbeitsaufkommen liegen. Dennoch sind für den überwiegenden Anteil aller Tätigkeiten im Rahmen der Produktionsplanung die zeitlichen Aufwendungen definiert. Die minimale Länge einer Unterbrechung kann immer dann bestimmt werden, wenn Erfahrungswerte für die zeitliche Dauer des auslösenden Ereignisses vorliegen. So sind Rüstzeiten, z.B. für die Erneuerung des Werkzeuges oder den Umbau auf ein anderes Produkt bekannt. Auch verschiedene Störungsfälle einzelner Maschinen können intergiert werden. In Abhängigkeit des Fehlerbildes, welches meist durch einen Fehlercode bzw. eine Fehlermeldung durch die Maschine beschrieben wird, ist es möglich, auf Grundlage von Erfahrungswerten die minimale Instandsetzungszeit zu bestimmen. Die Integration der zeitlichen Erfahrungswerte erfolgt durch eine manuelle Parametrisierung des Stand-by-Managers und/oder durch die dezentrale Bereitstellung der zeitlichen Informationen über die Maschinenschnittstellen. Sind keine Erfahrungswerte bekannt, bietet der Stand-by-Manager die Möglichkeit, die zeitlichen Intervalle einzulernen. Dazu erfolgt die dauerhafte Speicherung der Maschinenzustände, der Maschinenfehlercodes und deren zeitliche Dauer. Liegt eine repräsentative Stichprobe vor, erfolgt eine Datenfilterung und Aufbereitung. Mittels einer normalverteilten Funktion wird ein

Gültigkeitsbereich definiert. Nur die Kombination aus Zustand und Dauer, die in dem Gültigkeitsbereich liegen, wird für die Auswertung herangezogen. Die minimale Unterbrechungsdauer kann so für verschiedene Unterbrechungsbilder definiert werden. Die Speicherung und Auswertung der Daten erfolgt kontinuierlich, sodass eine permanente Anpassung des Gültigkeitsbereichs und der auf das Unterbrechungsbild definierten minimalen Zeit stattfindet.

Im normalen Produktionsablauf kommt es neben den bekannten Unterbrechungen und Störfällen auch zu zeitlichen Unterbrechungen, bei denen die Ursache nicht definiert ist, aber die zeitliche Dauer in einem Erwartungsbereich liegt. Dies ist immer dann der Fall, wenn ein Fertigungssystem laut Schicht- und Pausenkalender produzieren sollte und keine Störungen an den Maschinen vorliegen. Diese Unterbrechungen sind organisationsbedingt. Häufige Ursachen sind vorherrschender Teilemangel, Beladungsengpässe und künstliches Aufstauen von Bauteilen vor Maschinen durch den Mitarbeiter sowie schlecht geplante Pausen. Die Integration dieser zeitlichen Unterbrechungen in den Stand-by-Manager birgt ein großes Risiko, da sich die prognostizierte Zeit kurzfristig ändern kann und so die Ausbringung des Fertigungssystems verringert wird. Analog zu der Bestimmung der minimalen Unterbrechungszeit erfolgen auch bei dieser Methode eine statistische Auswertung der auftretenden Pausen und die Definition eines Erwartungsbereichs.

Nicht für alle Unterbrechungen ist es möglich, mithilfe statistischer Methoden oder einer exakten Fehlerbeschreibung die Länge zu bestimmen. Liegen keine Informationen bezüglich des auslösenden Ereignisses vor, kann auch keine Prognose bezüglich des Endes erfolgen. Dies ist z.B. der Fall, wenn Teilsysteme eines Fertigungssystems nicht miteinander vernetzt sind und die Information fehlt, wann benötigte Bauteile zur Verfügung stehen. Auch sind meist nicht alle möglichen Fehler, welche bei einer Maschine auftreten können, automatisch detektierbar. Für die beschriebenen Fälle muss der Mitarbeiter die zeitliche Dauer der Unterbrechung schätzen und diese dem Stand-by-Manager manuell über ein HMI vorgeben. Dieses Vorgehen birgt das Risiko, dass der Mitarbeiter die Länge der Unterbrechung falsch einschätzt und die prognostizierte Pause wesentlich kürzer ausfällt als ursprünglich geplant. Ist dies der Fall, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Maschinen, welche sich aufgrund der übermittelten Pausenzeit in einem Stand-by-Betrieb befinden, beim Eintreffen eines Bauteils noch nicht betriebsbereit sind und die Ausbringung des Fertigungssystems sinkt.

Um dieses Risiko zu minimieren, erfolgt durch den Stand-by-Manager eine Unterteilung der vom Mitarbeiter geschätzten Unterbrechungsdauer in einzelne Segmente. Abbildung 4.6 zeigt

exemplarisch die in die Berechnung zu integrierenden Pausenzeitfunktionen, mit und ohne Segmentierung. Der Mitarbeiter schätzt, dass ein 40-minütiger Störfall vorliegt. Ohne eine Segmentierung der Pausenzeit werden 40 Minuten als Pausenzeit vom Stand-by-Manager verarbeitet. Ist diese Zeit korrekt, kann das gesamte zeitliche Potenzial für einen Stand-by-Betrieb ausgeschöpft werden. Ist der Störfall vor der geschätzten Zeit behoben, z.B. nach 20 Minuten, dann ist davon auszugehen, dass sich noch einige nachgelagerte Maschinen in einem Stand-by-Betrieb befinden. Durch die Segmentierung der geschätzten Gesamtlänge der Pause wird dieser Effekt verringert. Der Stand-by-Manager verarbeitet bei einer Segmentierung nur die Pausenzeit der einzelnen Segmente und nicht die Gesamtlänge der Pause. Dies führt dazu, dass energetische Einsparpotenziale nicht vollständig genutzt werden, sich dafür aber im Falle eines frühzeitigen Pausenendes die Hochlaufzeiten der Maschinen verkürzen.

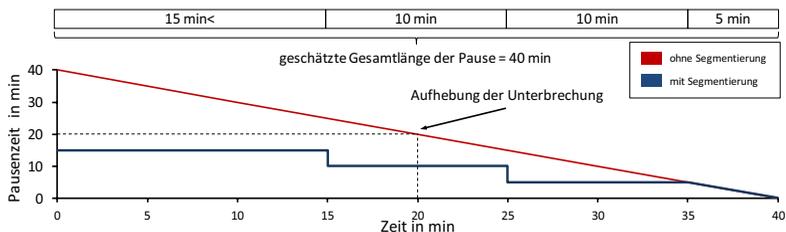


Abbildung 4.6: Beispiel der Hochlaufzeitminimierung

So wird im dargestellten Beispiel die geschätzte Pausenzeit in vier Segmente unterteilt. Der erste Abschnitt übermittelt dem Stand-by-Manager eine konstante Pausenzeit von 15 Minuten. Die Pausenzeit des ersten Segments bleibt konstant, da die Pausenlänge aller Segmente auf 40 Minuten bestimmt wurde. Das Gleiche gilt für das zweite und dritte Segment, wobei diese sich auf 10 Minuten verkürzt. Im vierten Segment erfolgt eine kontinuierliche Berechnung der Pausenlänge analog zu der Berechnung einer bekannten Pausenlänge.

Manipulationsmanagement

Jedes Fertigungssystem unterliegt gewollten und ungewollten Beeinflussungen durch den Mitarbeiter. Die Manipulationen müssen detektiert und softwareseitig abgefangen werden. Für den Stand-by-Manager sind genaue Positions- und Weginformationen sowie die Mengenzahl an Bauteilen erforderlich. Kommt es bei diesen Informationen zu Unregelmäßigkeiten, kann dies zu einer falschen Berechnung der Ankunftszeiten führen. Der Stand-by-Manager berücksichtigt im Manipulationsmanagement folgende Fälle:

1. Bauteile oder Werkstückträger werden von einem Mitarbeiter aus dem Transfersystem entnommen
2. Bauteile oder Werkstückträger werden in das Transfersystem an beliebiger Stelle eingefügt
3. Werkstückträger werden durch den Mitarbeiter aufgestaut, z.B. durch das manuelle Blockieren eines Teilabschnitts des Transfersystems
4. Werkstückträger werden durch den Mitarbeiter manuell auf dem Transfersystem in ihrer Position verändert

Das Manipulationsmanagement berechnet für jeden, sich im Fertigungssystem befindenden Werkstückträger eine Zwischenankunftszeit zu dem nächsten auf der Route vorkommenden Ziel. Als Ziele gelten alle die Materialfluss beeinflussenden Komponenten wie Maschinen, Weichen und Stopp-Positionen. Wird dieses Ziel nicht in der prognostizierten Zeit erreicht (zusätzlich Toleranz), ist zu erwarten, dass eine Manipulation am Fertigungssystem vorliegt. Die betroffenen Werkstückträger werden daraufhin im Berechnungsalgorithmus des Stand-by-Managers als nicht mehr existent behandelt und haben keinen Einfluss auf die Ankunftszeit-Berechnung. Werden zusätzlich Werkstückträger dem Transfersystem hinzugefügt oder erfolgt eine erneute Registrierung bereits aus dem System ausgebuchter Werkstückträger, kommt es zu einer Ergänzung der aktuellen Ankunftszeit-Berechnung.

Datenmanager

Die Funktionen des Datenmanagers werden in die Bereiche der Systemkonfiguration, der Daten-Analyse und der Daten-Archivierung unterteilt. Die Systemkonfiguration beinhaltet alle für den Stand-by-Manager relevanten unveränderlichen Daten, die das Fertigungssystem in seinen Eigenschaften beschreibt. Dazu zählen beispielsweise die Raumkoordinaten des Transfersystems und der Maschinen, die Anzahl der Maschinen im Fertigungssystem und die verschiedenen Bauteiltypen mit zugehöriger Arbeitsfolge. Im Bereich der Daten-Analyse sind fertigungssystemspezifische Auswertungen integriert. Dazu zählen z.B. die im Rüstzeit-, Pausen- und Störzeitmanagement beschriebenen Analysen bzgl. der Minimalzeiten, die statistische Auswertung von Unterbrechungen und energetische Potenzialstudien, sowohl auch Engpassanalysen anhand der aktuellen Materialflusssituation. Im Bereich der Archivierung erfolgt für einen definierten Zeitraum die Protokollierung relevanter Systemdaten. Dazu zählen sowohl die Zykluszeit des Programmablaufs, die Auslastung des CPU und des Speichers als auch die Dokumentation von Systemfehlern in einem Ringpuffer. Die archivierten Daten dienen ausschließlich der Fehlerrückverfolgbarkeit und der Systemdiagnose.

4.3 Umsetzungsplattformen

Die programmtechnische Umsetzung kann auf verschiedenen Betriebssystemen, Hardwareplattformen und Laufzeitumgebungen erfolgen. Maßgebliche Kriterien für die Auswahl der Umsetzungsplattform sind die Integrierbarkeit der Software in bestehende Hardwarestrukturen und die Verarbeitungsgeschwindigkeit der anfallenden Daten. Der Stand-by-Manager wurde auf drei unterschiedlichen Umsetzungsplattformen entwickelt, mit jeweils unterschiedlichen Entwicklungszielen.

Simulationsumgebung

In einer Simulationsumgebung ist es möglich, gesamte Fertigungssysteme in einem hohen Detaillierungsgrad abzubilden. Dabei können unterschiedliche Materialflusssteuerungen mit zugehöriger Sensorik implementiert und erprobt werden. Anhand eines modellierten Fertigungssystems erfolgt in der Simulationsumgebung die programmtechnische Entwicklung, Erprobung und Validierung des Stand-by-Managers. Der Fokus liegt auf dem Funktionsbaustein der Zeitprognose. Ziel ist die Bestimmung der Minimalanforderung an die zur Berechnung der Ankunftszeit benötigten Daten in Bezug auf Informationsgehalt und Anzahl der Datenpunkte.

Speicherprogrammierbare-Steuerung

Die Umsetzung des Stand-by-Managers auf speicherprogrammierbare Steuerungen bietet den Vorteil, dass die Integration maschinennah auf der Steuerungsebene stattfindet. So können benötigte dynamische Daten aus dem Automatisierungssystem i.d.R. mit einem geringen Aufwand aus anderen Steuerungsanwendungen in Echtzeit bezogen werden. Auch ermöglichen aktuelle Kommunikationsstandards einen einfachen Datenaustausch mit PC-basierten Systemen oder Datenbanken. Ziel ist die Übertragung der in der Simulation entwickelten Softwarelogik auf eine speicherprogrammierbare Steuerung.

Hochsprachenentwicklung

Die Entwicklung des Stand-by-Managers in einer Hochsprachenapplikation bietet den Vorteil, dass die Software in bestehende SCADA/MES Infrastrukturen integriert werden kann. Zudem soll in der Hochsprachenprogrammierung die individuelle Anpassung der Software für jedes Fertigungssystem auf ein Minimum begrenzt werden. Das Entwicklungsziel ist deshalb die Übertragung des Stand-by-Managers in eine Hochsprachenapplikation mit skalierbaren Funktionalitäten.

4.4 Berechnungsgrundlage der bauteilspezifischen Ankunftszeit

Die programmtechnische Entwicklung erfolgte auf den oben beschriebenen Umsetzungsplattformen. Entsprechend den Besonderheiten und Möglichkeiten der einzelnen Programmiersprachen sowie deren zeitlicher Entstehung unterscheiden sich die Programme in Funktionsumfang und dem Untersuchungsschwerpunkt. Allen gemein ist als Kernfunktion die Zeitermittlung, welche in Abhängigkeit der vorherrschenden Produktionssituation die Ankunftszeit der Bauteile für die Maschinen berechnet. In diesem Abschnitt erfolgt die detaillierte Darstellung der Programmlogik des entwickelten Stand-by-Managers mit dem Fokus auf der zeitlichen Prognose der Ankunftszeiten.

4.4.1 Grundlogik des Stand-by-Managers

Vereinfacht kann die Berechnungsgrundlage der Ankunftszeitberechnung anhand von sechs Fällen erläutert werden. Dafür zeigt Abbildung 4.7 einzelne Fallbeispiele, bei denen der Startpunkt, die auftretenden Unterbrechungen, die Wartezeiten sowie das Ziel eines Bauteils entlang seiner definierten Route im Transfersystem (rot eingezeichnet) dargestellt sind.

Im ersten Fall ist der Weichenbereich das Ziel des Werkstückträgers vor der Maschinenzuführung. Der Werkstückträger befindet sich auf dem Hauptband und kann ungestört die Weiche erreichen. Die Zeit, die der Werkstückträger von seiner Startposition zu seiner Zielposition benötigt, ist nur abhängig von der Länge und Geschwindigkeit des Transfersystems und wird als Streckenabschnittszeit (t_s) definiert.

Im zweiten Fall ist die Maschine das Ziel des Werkstückträgers. Um diese zu erreichen, muss zusätzlich der Weichenbereich überquert werden. Die Zeit, die der Werkstückträger von der Startposition zu seiner Zielposition benötigt, ist damit abhängig von der Streckenabschnittszeit, welche die räumlichen Abmessungen und Geschwindigkeiten beinhaltet und den Wartezeiten, (t_{UB}), welche durch das Bauteilhandling entstehen.

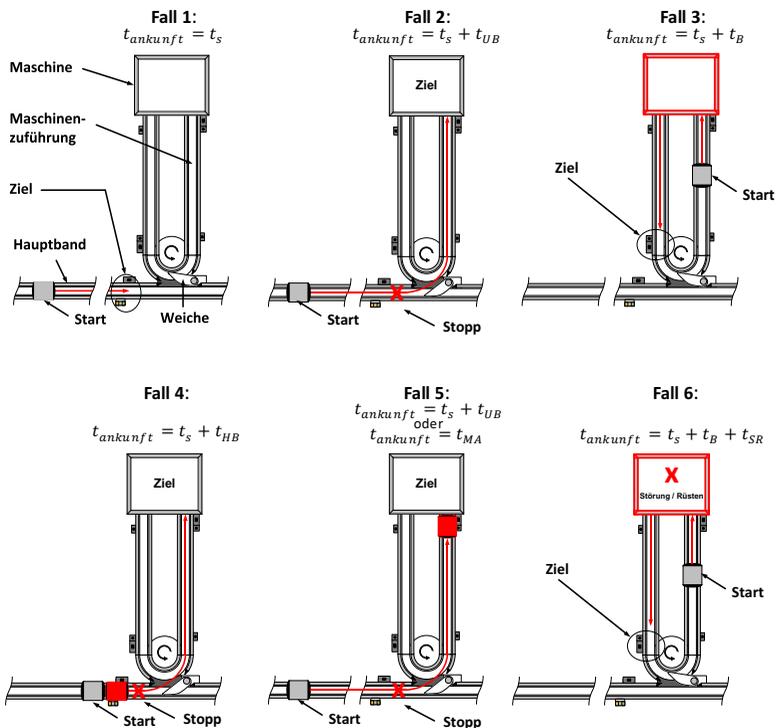


Abbildung 4.7: Fallbeispiele der Zeitenberechnung (in Anlehnung an Lau 2016, S. 43)

Tabelle 4.1: Variablenbeschreibung der Ankunftszeitenberechnung

Variablen	Symbol	Beschreibung	Eigenschaft
Ankunftszeit	$t_{Ankunft}$	Die Zeit, wann ein Bauteil zur Bearbeitung in eine Maschine einfährt	dynamisch
Streckenabschnittszeit	t_s	Die Zeit, die das Bauteil aufgrund der geometrischen Abmessungen und seiner Transportgeschwindigkeit benötigt um das geplante Ziel zu erreichen	statisch
Bearbeitungszeit	t_B	Die Zeit, die das Bauteil in der Maschine bearbeitet wird	statisch
BearbeitungszeitRest	t_{BR}	Die verbleibende Zeit, die das Bauteil zum Zeitpunkt t noch in der Maschine bearbeitet wird	dynamisch
WartezeitUB	t_{UB}	Die Summe der Handlungszeiten, bei der sich ein Bauteil von einem Unterbrechungselement wie z.B. einem Stopper, einer Weiche oder einem Sortierer im Eingriff befindet	statisch
WartezeitHB	t_{HB}	Die Zeit, die ein Bauteil auf dem Hauptband aufgrund vorgelagerter aufgestauter Bauteile benötigt, um ein Unterbrechungselement zu erreichen	dynamisch
WartezeitMA	t_{MA}	Die Zeit, die ein Bauteil in der Maschinenzuführung aufgrund vorgelagerter aufgestauter Bauteile benötigt, um die Maschine zu erreichen	dynamisch
Stör-/Rüstzeiten	t_{SR}	Die Zeiten, die Störungen und Rüstvorgänge an der Maschine benötigen	dynamisch

Im dritten Fall befindet sich das Bauteil in der Maschinenzuführung. Das Ziel ist der Weichenbereich nach der Maschine. Um diesen zu erreichen, muss die Maschine durchlaufen werden. Die Zeit, die dafür benötigt wird, ist als Bearbeitungszeit (t_B) definiert. Die Ankunftszeit des Werkstückträgers ergibt sich aus der Summe der Streckenabschnittszeiten und der Bearbeitungszeit.

Das Ziel des Werkstückträgers im vierten Fall ist ebenfalls die Maschine. Vor dem Weichenbereich in der Einfahrt zu der Maschinenzuführung befindet sich jedoch ein zusätzlicher Werkstückträger, weshalb es sich in diesem Bereich aufstaut. Die Zeit, welche aufgrund des vorgelagerten Werkstückträgers benötigt wird, um den Weichenbereich oder ein anderes Unterbrechungselement auf dem Hauptband zu passieren, ist als WartezeitHB (t_{HB}) definiert. Die Ankunftszeit, die der Werkstückträger benötigt, um von seiner Startposition die Zielposition zu erreichen, ist die Summe aus den Streckenzeiten und der WartezeitHB.

Im Fall 5 befindet sich ein zusätzlicher Werkstückträger in der Maschinenzuführung. Bevor die Maschine als festgelegtes Ziel vom betrachteten Werkstückträger erreicht werden kann, muss der vorgelagerte Werkstückträger die Maschine durchlaufen haben. Die Dauer, die sich ein Werkstückträger aufgrund von Stau- und Puffereffekten in der Maschinenzuführung befindet, wird als WartezeitMA (t_{MA}) definiert. Für den dargestellten Fall muss bei der Berechnung der Ankunftszeit unterschieden werden, ob die WartezeitMA kürzer oder länger ist als die Summe aus Streckenzeit und WartezeitUB. Ist die WartezeitMA länger, wird die Ankunftszeit gleich der WartezeitMA. Ist sie kürzer, spielt bei der Berechnung die WartezeitMA keine Rolle und die Ankunftszeit ist die Summe aus Streckenzeit und WartezeitUB.

Der sechste Fall ist identisch zu Fall 3, nur dass zusätzlich Störungen und Rüstvorgänge berücksichtigt werden. Die Ankunftszeit des Warenträgers an seiner Zielposition ergibt sich in diesem Fall aus der Summe der Streckenabschnittszeiten, der Bearbeitungszeit und der Stör- oder Rüstzeit (t_{SR}) der Maschine.

Ein alleiniges Auftreten der beschriebenen Fälle stellt bei einem realen Transfersystem die Ausnahme dar; vielmehr kommt es zu einer Kombination dieser.

4.4.2 Ankunftszeitberechnung

Die in Formel (4.1) erläuterte Beziehung der Ankunftszeitenberechnung gilt unter der Annahme eines idealen Teiletransportes auf dem Transfersystem. Dabei werden die Bauteile ohne Puffer Just-in-time angeliefert und es kommt zu keinen ungeplanten Unterbrechungen im System. Reale Fertigungssysteme zeigen dieses Verhalten meist nicht. Deshalb erfolgt eine Erweiterung der

Ankunftszeitenberechnung, bei welcher ungeplante Unterbrechungen und das Aufstauen und Puffern von Bauteilen Berücksichtigung finden. Dafür müssen alle in der Grundlogik beschriebenen Fälle und deren Kombinationen abbildbar sein.

Für die Berechnung wird mithilfe einer Fallunterscheidung bestimmt, ob der betrachtete Werkstückträger die als Ziel definierte Maschine direkt erreicht (Fall 1 Abbildung 4.8) oder ob der Werkstückträger vor der Einfahrt in die Maschine in der Maschinenzuführung gestoppt und gestaut wird (Fall 2 Abbildung 4.8). Zusätzlich finden die Staustrecken des Hauptbands und der Maschinenzuführungen sowie die verbleibende Bearbeitungszeit (t_{BR}) Berücksichtigung (vgl. Abbildung 4.8).

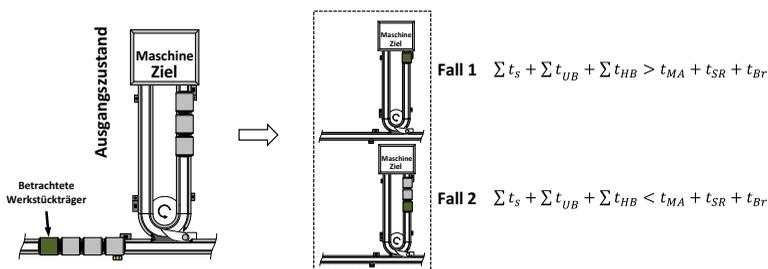


Abbildung 4.8: Fallunterscheidung der Ankunftszeitberechnung

Für den ersten Fall berechnet sich die Ankunftszeit für ein Ziel aus den einzelnen Zeiten der Streckenabschnitte, der einzelnen Stillstandszeiten, welche durch die Unterbrechungselemente entstehen und den Wartezeiten aufgrund vorgelagerter Werkstückträger, die einen Weitertransport verzögern (vgl. Formel(4.2)).

$$t_{Ankunft} = \begin{cases} \sum t_s + \sum t_{UB} + \sum t_{HB} & : \text{Fall 1} \\ t_{MA} + t_{SR} + t_{BR} & : \text{Fall 2} \end{cases} \quad (4.2)$$

Im zweiten Fall befinden sich zum Zeitpunkt der Einfahrt des betrachteten Werkstückträgers in die Maschinenzuführung vor der Zielmaschine noch weitere Werkstückträger. Diese werden vorrangig bearbeitet. Die Ankunftszeitberechnung ist demnach bestimmt durch die Zeit, welche aufgrund vorgelagerter Werkstückträger (t_{MA}) benötigt wird, um die Zielmaschine zu erreichen, der Zeit, die nach dem Erreichen der Maschine benötigt wird, um in die Maschine einzufahren (t_{BR}) und der Zeit, welche evtl. durch Störungen oder Rüstvorgänge (t_{SR}) vorliegt.

Die in Formel (4.2) beschriebene Beziehung besitzt jedoch nur Gültigkeit, solange das Bauteil ausschließlich ein einzelnes Ziel besitzt. Komplexe Routen, bei denen ein Bauteil in Form einer Arbeitsfolge mehrere Prozesse bzw. Ziele anfährt, können nicht berechnet werden.

Für die Berechnung der Ankunftszeit mit mehreren Zielen erfolgt die Zerlegung der Route in Teilziele. Dafür wird ausgehend vom Startpunkt für zwei aufeinander folgende Ziele eine Teilzeit bestimmt. Die Teilzeit ($t_{Teilzeit}$) repräsentiert die zeitlichen Transportmechanismen zwischen den Zielen und entspricht der Ankunftszeitberechnung aus Formel (4.2), wobei sich der Startpunkt der Berechnung fortlaufend verschiebt (vgl. Abbildung 4.9). Zusätzlich finden die einzelnen Bearbeitungszeiten der einzelnen Ziele Berücksichtigung.

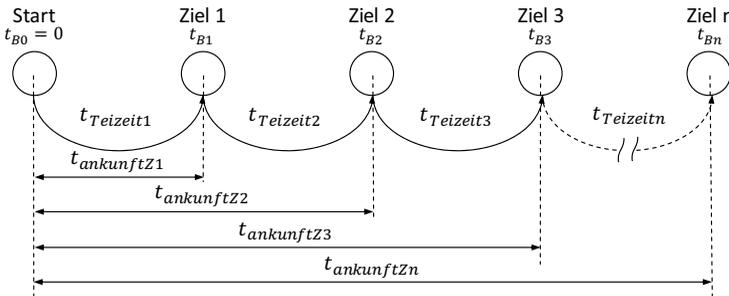


Abbildung 4.9: Ankunftszeitberechnung für komplexe Routen

Die Ankunftszeit berechnet sich demnach für beliebige Ziele aus den Summen der einzelnen Bearbeitungszeiten und den Summen der einzelnen Teilzeiten zwischen den Zielen (vgl. Formel (4.3)).

$$t_{AnkunftZn} = \sum_{1}^n t_{B(n-1)} + \sum_{1}^n t_{Teilzeit(n)} \quad (4.3)$$

4.5 Programmtechnische Umsetzung

Die Umsetzung des Stand-by-Managers erfolgt simulativ auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung und in der Programmhochsprache Microsoft Visual Basic .NET. Die Darstellung der logischen Zusammenhänge des entwickelten Stand-by-Managers beschränkt sich in diesem Abschnitt jedoch auf die Hochsprachenprogrammierung mit MS VB. NET.

Ziel der Entwicklung ist, neben den im Kapitel 4.2.2 beschriebenen Funktionen, die einfache Skalier- und Übertragbarkeit des Stand-by-Managers auf Fertigungssysteme unterschiedlicher Größe. Dazu muss der Stand-by-Manager eine variable Anzahl an Maschinen und Anlagen, unterschiedliche geometrische Abmessungen sowie verschiedene Bauteiltypen bei der Berechnung berücksichtigen.

4.5.1 Skalierungsmodell

Die für die Ankunftszeitenberechnungen zur Verfügung stehenden Sensoren und Informationen werden anhand einer Systembeschreibung in Kapitel 5.3 bestimmt. Aufbauend darauf ist ein Skalierungsmodell entstanden, mit welchem im Rahmen eines initialen Konfigurationsprozesses unterschiedliche Fertigungssysteme abgebildet werden können. Dem Skalierungsmodell liegen die Anforderungen zu Grunde, dass ausschließlich Sensoren, welche ohnehin für die Materialflusssteuerung benötigt werden, zur Ankunftszeitberechnung verwendet werden. In Abbildung 4.10 sind die erforderlichen Sensoren, Beziehungen und Konfigurationsdaten des Skalierungsmodells dargestellt.

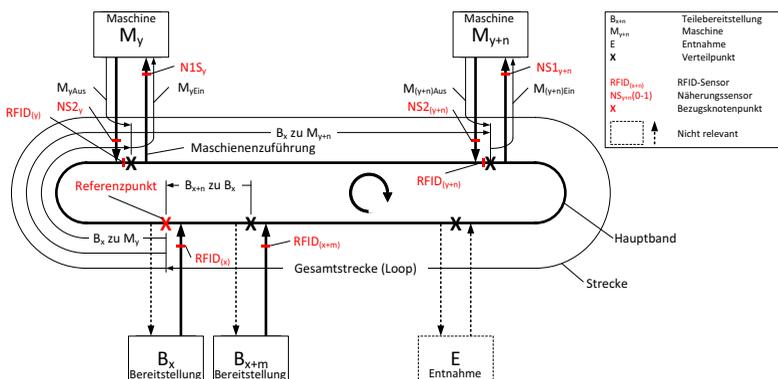


Abbildung 4.10: Skalierungsmodell des Stand-by-Managers (in Anlehnung an Lau 2016, S. 43)

Tabelle 4.2: Variablenbeschreibung des Skalierungsmodells

Beschreibung	Beschreibung	Typ	Eigenschaft
B_x zu M_y	Die Länge von dem Bezugsverteilpunkt zu der jeweiligen Maschine	Länge	statisch
B_{xEin} zu B_x	Die Länge von dem Bezugsverteilpunkt zu der jeweiligen Teilebereitstellung	Länge	statisch
M_{yEin}	Die Länge der Förderstrecke vor einer Maschine	Länge	statisch
M_{yAus}	Die Länge der Förderstrecke nach einer Maschine	Länge	statisch
X zu RFID _y	Die Länge von dem Bezugsknotenpunkt zu dem jeweiligen maschinenzugeordneten RFID-Sensor	Länge	statisch
Gesamtstrecke	Die Gesamtlänge des Hauptbands	Länge	statisch
RFID _(y)	Ein der Maschine (y) zugeordneter RFID-Sensor, welcher bauteilspezifische Informationen ausliest	Datenpunkt	dynamisch
NS1 _(y)	Ein der Maschinenzuführung (y) zugeordneter Näherungssensor, welcher die Einfahrt eines Bauteils registriert	Datenpunkt	dynamisch
NS2(y)	Ein der Maschinenzuführung (y) zugeordneter Näherungssensor, welcher die Ausfahrt eines Bauteils registriert	Datenpunkt	dynamisch

Die Anzahl an Maschinen und Teilebereitstellung kann beliebig gewählt werden, auch ist für die Konfiguration die reale Geometrie des Fertigungssystems unerheblich. Es ist ausreichend von einem Referenzpunkt aus, die Längen der Förderstrecken zu den Maschinen und die Positionen der Sensortechnik des Fertigungssystems zu erfassen. Die geometrischen Abmessungen stellen die Grundlage der Streckenabschnittszeitberechnung sowie der Wartezeitberechnung dar. Die RFID-Sensorik ermöglicht abschnittsweise eine Bauteilidentifizierung und Positionsbestimmung. Mithilfe der Näherungssensoren wird erkannt, wie viele Bauteile sich in welchem Abschnitt auf dem Hauptband und in der Maschinenzuführung befinden. Eine genaue Beschreibung der erforderlichen Daten zur Ankunftszeitberechnung kann Tabelle 4.2 entnommen werden.

4.5.2 Programmstruktur

Die Programmstruktur des Stand-by-Managers, bestehend aus einem Hauptprogramm und drei Unterprogrammen und ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Im Unterprogramm *Konfiguration.vb* erfolgt einmalig die Parametrisierung des Hauptprogramms *Main.vb* mit den fertigungssystemspezifischen Parametern (vgl. Tabelle 4.2). Als Programmspeicher wird die Programmbibliothek SQLite verwendet, in welcher im integrierten Datenbanksystem sowohl die Konfigurationsdaten als auch die berechneten Datensätze dauerhaft gespeichert werden. Das Unterprogramm *SQL.vb* ist die Schnittstelle zwischen den einzelnen Programmteilen und der Datenbank.

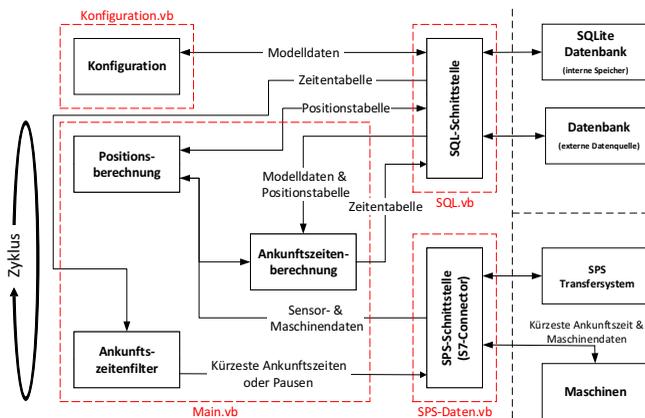


Abbildung 4.11: Programmstruktur des Stand-by-Managers (in Anlehnung an Lau 2016, S. 43)

Die bidirektionale Kommunikation mit der Maschinen- und Anlagentechnik erfolgt mithilfe einer in die NET-Sprache integrierten Bibliothek (S7-Connector), die im Unterprogramm *SPS-Daten.vb* enthalten ist. Das Hauptprogramm *Main.vb* berechnet mithilfe der Konfigurations- und Maschinendaten die Ankunftszeit und übergibt diese an die Maschine. Dazu erfolgt in einer festgelegten Reihenfolge der zyklische Programmaufruf der Unterprogramme durch das Hauptprogramm. Nach der initialen Konfiguration werden die Maschinen und Sensordaten abgerufen. Anhand dieser erfolgt für jeden, sich im Fertigungssystem befindenden Werkstückträger die Berechnung der aktuellen Position. Die Positionsbestimmung ist ein zentrales Element der Ankunftszeitenberechnung. In ihr wird berechnet, wie viele Werkstückträger sich an welcher Position auf dem Hauptband und in den Maschinenzuführungen befinden. Die eindeutige Positionsbestimmung der Werkstückträger erfolgt mithilfe der RFID-Sensorik. Sobald ein Werkstückträger erstmalig von einem RFID-Sensor erkannt wird, wird für diesen ein Datensatz in einer Positionsdatenbank erzeugt, welcher die aktuelle Position, die auf der Route anzufahrenden Ziele sowie auch eine fest vergebene Werkstückträger ID beinhaltet. Dieser Datensatz wird über den gesamten Produktionsprozess mitgeführt und die Position des Werkstückträgers in Abhängigkeit der durchlaufenen einzelnen Produktionsschritte aktualisiert. Verlässt der Werkstückträger den Identifikationsbereich des Sensors, kann die Position nur noch mithilfe eines Rechenmodells annäherungsweise berechnet werden. Dazu erfolgt die Segmentierung des Transfersystems in Teilstrecken (vgl. Abbildung 4.12).

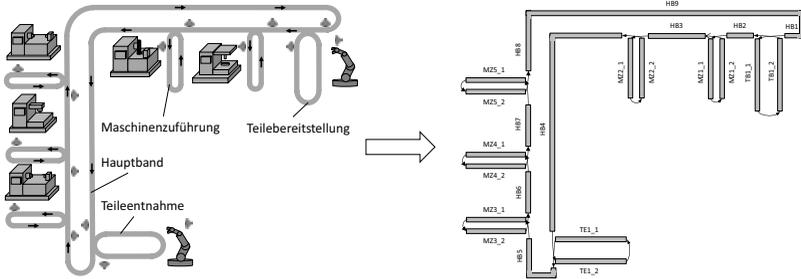


Abbildung 4.12: Beispiel für die Segmentierung des Fertigungssystems

Die Positionsberechnung der Werkstückträger auf den Teilstrecken erfolgt anhand der Länge und Geschwindigkeit des Förderbands, der auf den Teilstrecken vorhandenen Unterbrechungselemente und der vorgelagerten Werkstückträger, welche Stau- und Puffereffekte verursachen. Die Längen der Teilstrecken werden mithilfe der Sensorpositionen berechnet, welche im Konfigurationsbereich festgelegt wurden. Die Bestimmung der Anzahl vorgelagerter Werkstückträger auf den Teilstrecken erfolgt über die Filterung der Datensätze der Positionsdatenbank des internen Speichers. Auf Basis der Datensätze der Positionsdatenbank und der gelesenen Sensor- und Maschinendaten werden die Ankunftszeiten für alle im System vorhandenen Werkstückträger berechnet und in eine interne Zeitentabelle geschrieben. Die berechneten Ankunftszeiten werden abschließend hinsichtlich ihrer Länge gefiltert und es erfolgt die Übertragung der kürzesten Zeit an die Maschine.

4.6 Abschaltkonzepte auf Maschinenebene

Im Bereich der mechanischen Fertigung einer Baugruppenproduktion handelt es sich bei den Werkzeugmaschinen meist um standardisierte Sondermaschinen. So kommt es vor, dass auch typgleiche Maschinen unterschiedliche Maschinenkomponenten und Softwarestände aufweisen. Dies erschwert eine standardisierte Vorgabe von Stand-by-Konzepten für einzelne Maschinen, sodass geeignete Abschaltstrategien meist maschinenspezifisch entwickelt werden müssen. Dennoch besitzen bereits etliche Maschinen integrierte Stand-by-Betriebsweisen (vgl. Kapitel 2.3), welche zusätzlich um die Aktivierung durch den Stand-by-Manager erweitert werden können.

Zur Anbindung und Verarbeitung der Informationen des Stand-by-Managers muss eine Erweiterung der Betriebszustände in der Maschinensteuerung erfolgen. Abbildung 4.13 zeigt eine Methode zur Erweiterung des Funktionsablaufs einer maschinenspezifischen Abschaltstrategie, welche für den automatischen Stand-by-Betrieb angepasst wurde.

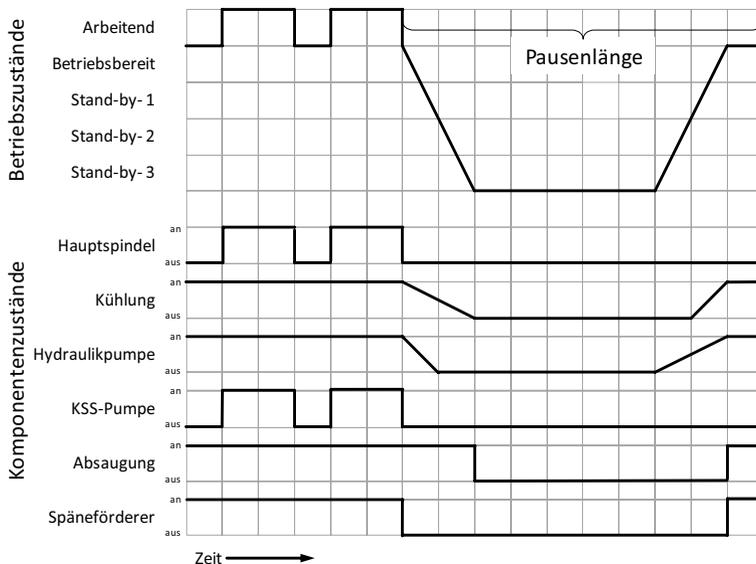


Abbildung 4.13: Beispiel einer maschinenspezifischen Abschaltstrategie

Dargestellt sind die Zustände der einzelnen Maschinenkomponenten in Abhängigkeit der Betriebsart der Maschine. Produziert die Maschine oder ist betriebsbereit, ist der überwiegende Teil der Komponenten dauerhaft eingeschaltet. Lediglich die Hauptspindel und die Kühlmittelpumpe folgen der Betriebsweise der Maschine. Der Stand-by-Manager überträgt die Information des Pausenbeginns und der Pausenlänge, weshalb die Maschine in der Lage ist, den Stand-by-Betrieb 3 einzunehmen. Der Wechsel in diesen Betriebszustand kann jedoch nicht unmittelbar erfolgen, da einige Maschinenkomponenten prozess- und/oder maschinenbedingt definierte Nachlaufzeit einhalten müssen. So wird die Maschine auch nach dem Fertigungsprozess eine definierte Zeit gekühlt und auch das Hydraulikaggregat benötigt eine bestimmte Zeit, um seinen Betriebsdruck zu verringern. Analog zur Nachlaufzeit besitzen einige Komponenten bzw. die Maschine einzuhaltende Hochlaufzeiten, um einen betriebsbereiten Zustand zu erreichen. Diese sind in der maschinenspezifischen Ab- und Anschaltstrategie definiert. In Abhängigkeit der aktuellen Pausenlänge wechselt die Maschine in einen anderen Stand-by-Modus bzw. in den betriebsbereiten Zustand. So erfolgt in diesem Beispiel ein automatisches Starten des Kühl- und Hydrauliksystems. Zusätzlich erfolgt das automatische Wiedereinschalten der Absaugung des Späneförderers bei einem Zustandswechsel in die Betriebsart *Betriebsbereit*.

4.6.1 Maschinenspezifische Abschaltstrategien

Auf Grundlage der in Kapitel 3.3.3 erhobenen Lastganganalyse und der oben beschriebenen Methodik werden im Rahmen eines Umsetzungsprojektes zur Integration des Stand-by-Managers in ein Fertigungssystem, maschinenspezifische Abschaltstrategien für verschiedenen Prozesse entwickelt. In Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 ist ein Auszug der Ergebnisse dargestellt. Diese zeigen die spezifischen Hochlauf- und Nachlaufzeiten, die Mindestabschaltdauer sowie den Zustand der einzelnen Maschinenkomponenten. Weitere Abschaltstrategien sind im Anhang A zu finden.

Die Betriebsweise des dargestellten Schleifprozesses wird um drei Stand-by-Betriebsweisen erweitert.

Tabelle 4.3: Maschinenspezifische Abschaltstrategie einer Schleifmaschine

	Schleifprozess				Leistung	Komponenten			
	$t_{\text{runderfahren}}$	t_{min}	$t_{\text{hochfahren}}$	t_{standby}		NC-Achsen	KSS-Druckerhöhung	Hydraulikkühlung	Nebenaggregate
Arbeitend					15,20 kW	An	An	An	An
Betriebsbereit					12,20 kW	gedrosselt	An	An	An
Stand-by 1	1,0 min	1,0 min	1,0 min	3,0 min	8,60 kW	gedrosselt	gedrosselt	An	An
Stand-by 2	10,0 min	0,0 min	0,0 min	10,0 min	8,27 kW	gedrosselt	Aus	An	Aus
Stand-by 3	10,0 min	20,0 min	90,0 min	120,0 min	2,00 kW	Aus	Aus	Aus	Aus

Im *Stand-by-Betrieb 1* erfolgt eine Reduzierung des Drucks und des Volumenstroms in der Druckerhöhungsstation des Kühlschmierstoffsystems sowie eine Drosselung der NC-Achsen. Dies führt zu einer Verringerung der Leistungsaufnahme gegenüber dem Zustand *Betriebsbereit* um 30 %. Die Drosselung der Druckerhöhungsstation als auch der NC-Achsen erfolgt schon bei kurzen Unterbrechungszeiten ab drei Minuten. Im *Stand-by-Betrieb 2* erfolgt das komplette Anschalten der Druckerhöhungsstation sowie der Nebenaggregate (Spindelkühlung, Transportband, Ölabscheider), welches jedoch nur eine geringe Absenkung in der Leistungsaufnahme verursacht. Der *Stand-by-Betrieb 3* wird bei sehr langen Pausen eingenommen, die Hochlaufzeit beträgt ca. 90 Minuten, weshalb das Ausschalten aller relevanten Komponenten erst ab einer Unterbrechung von 120 Minuten stattfindet.

Der Funktionsumfang der in Tabelle 4.4 dargestellten Fräsmaschine wird um zwei zusätzliche Stand-by-Betriebsweisen ergänzt. Durch die Drehzahlreduktion der Hauptspindel wird im *Stand-by-Level 1* im Bezug zum Zustand *Betriebsbereit* eine 35 %ige Leistungsreduktion erreicht. Die Senkung der Drehzahl erfolgt bereits bei kurzen Pausen ab einer Zeitspanne von drei Minuten. Im *Stand-by-Betrieb 2* erfolgt zusätzlich das Ausschalten der Rückkühlanlage, der Hydraulikpumpe und der Maschinenkühlung, daraus resultiert eine Reduktion des Leistungsbedarfs um 92 %.

Tabelle 4.4: Maschinenspezifische Abschaltstrategie einer Fräsmaschine

	Fräsprozess				Leistung	Komponenten			
	$t_{\text{Runterfahren}}$	t_{min}	$t_{\text{Hochfahren}}$	t_{Standby}		Servoachsen	Rückkühlanlage	Hydraulikpumpe	Maschinenkühlung
Arbeitend	-				6,10 kW	An	An	An	An
Betriebsbereit	-				5,10 kW	gedrosselt	An	An	An
Stand-by 1	1,0 min	2,0 min	0,0 min	3,0 min	3,30 kW	gedrosselt	An	An	An
Stand-by 2	2,0 min	5,0 min	1,0 min	8,0 min	0,40 kW	Aus	Aus	Aus	Aus

Die entwickelten Stand-by-Strategien sind von den Maschinenherstellern als technisch umsetzbar bewertet worden und werden im Rahmen eines Pilotprojekts umgesetzt. Eventuell auftretende Probleme werden in einer Testphase ermittelt und sind nicht Bestandteil dieser Arbeit.

4.6.2 Hemmnisse Stand-by-Strategien

Nicht jede Maschine ist in der Lage, nach einer längeren Stillstandzeit ohne das Eingreifen eines Mitarbeiters automatisch i.O. Teile zu produzieren. Dies ist häufig bei hochgenauen Prozessen, wie beispielsweise Schleifprozessen, der Fall. So können Maßabweichungen durch die thermischen Längenänderungen der Maschine entstehen. Diese werden dann messtechnisch ermittelt und durch den Mitarbeiter korrigiert. Ist eine Maschine nicht in der Lage, dieses Verfahren zu automatisieren, kann die Funktionalität des Stand-by-Managers nur bedingt genutzt werden. Auch spielen sicherheitsrelevante Aspekte beim Maschinenanlauf eine wichtige Rolle. Es muss verhindert werden, dass Maschinenkomponenten selbstständig anlaufen, die im Eingriffsbereich von Mitarbeitern liegen. Zudem kann z.B. durch die Anzahl erhöhter Schaltzyklen die Lebensdauer der Komponenten verringert werden, was zu einem Zielkonflikt zwischen Energieeinsparung und Wartungs- bzw. Instandsetzungsintervallen führt.

Kapitel 5

Modellbildung Fertigungssystem

Nach der Entwicklung des Stand-by-Managers und der vorangegangenen Potenzialstudie folgt eine Produktionssystemsimulation. In dieser werden die Maschinen, das Transfersystem und die Steuerungen eines Fertigungssystems simulativ abgebildet.

Der Schwerpunkt liegt auf der energetischen Bewertung verschiedener Stand-by-Strategien. Die erreichbaren energetischen Einsparpotenziale durch die Anwendung des Stand-by-Managers, im Vergleich zu konventionellen Strategien, bilden den Fokus der Untersuchung.

Das Gesamtmodell, welches das Fertigungssystem einer Baugruppenfertigung darstellt, besteht aus Einzelmaschinen, die in Teilsystemen durch Transfersysteme verbunden sind. Die Nachbildung des Fertigungssystems erfolgt durch die Modellierung einzelner Teilsysteme. Die Teilsysteme repräsentieren einzelne Produktionslinien, welche aus Teilmodellen bestehen und durch Schnittstellen miteinander gekoppelt sind. Die entwickelten Transfersystemmodelle ermöglichen die Simulation des Materialflusses und der Fertigungssteuerung. Die fertigungstechnische und energetische Modellierung der Maschinen und Anlagen erfolgt in einzelnen Maschinenmodellen. Der Aufbau der Simulationsdatenbasis wird anhand der in der VDI Richtlinie 3633 Blatt 1 beschriebenen Struktur durchgeführt. Dazu werden Informationen bezüglich der Systemlast, der organisatorischen Abläufe, der technischen Daten sowie der Energiebedarfe integriert.

Als Simulationswerkzeug wird die Software Tecnomatix Plant Simulation eingesetzt. Die Software wurde zur Modellierung und Simulation von Produktions- und Logistiksystemen entwickelt und wird in vielen Bereichen der Automobilindustrie eingesetzt. Bei der Software handelt es sich um ein diskretes Ereignissimulationswerkzeug, welches eine Vielzahl entwickelter Module für eine

Nachbildung industrieller Fertigungsstrukturen beinhaltet. Zudem sind Standardfunktionalitäten bezüglich der Energieflusssimulation und Energiebedarfssimulation integriert.

5.1 Detaillierungsgrad

Ein reales System in der Automatisierungstechnik beinhaltet komplexe Zusammenhänge, welche meist in der Gesamtheit in einem Modell nicht oder nur mit sehr großem Aufwand wiedergegeben werden können (vgl. Friedrich 2009, S. 9; Schäfer 2013, S. 100; Zirn und Weikert 2006, S. 35–39). Um den Aufwand der Modellierung einzugrenzen, ist es deshalb erforderlich, Vereinfachungen zu treffen, welche die Aussagekraft der gesuchten Ergebnisse nicht beeinträchtigen.

Schlüter (2013, S. 58) unterteilt zur Modellierung von Maschinen und Anlagen die Art der Modelle in physikalische und datenbasierte Modelle sowie stationäre und dynamische Modelle. Er verweist darauf, dass kennlinienbasierte Modelle den gesuchten Zusammenhang meist hinreichend gut abbilden und der Modellierungsaufwand im Vergleich zu physikalischen Modellen deutlich geringer ist (vgl. Schlüter 2013, S. 59). Die in dieser Arbeit entwickelten Modelle der Maschinen und Anlagen sind durchgehend mithilfe von realen Messdaten entstanden. Die Integrationsmethoden der energetischen Produktionssimulation sind in Kapitel 5.5.1 beschrieben.

Das Transfersystem der Baugruppenfertigung besteht aus Standardkomponenten, welche anwendungsspezifisch zusammengesetzt und evtl. angepasst werden. Im Rahmen der Modellbildung wurden Systemmodelle der meist eingesetzten Standardkomponenten des Transfersystems entwickelt. Dabei wurde auf die Abbildung stark anwendungsspezifischer Funktionen des Realsystems verzichtet.

5.2 Verifizierung und Validierung der Modellkomponenten

Die VDI Richtlinie 3633 verweist auf die Wichtigkeit der Verifizierung und Validierung (V&V). Ziel ist es, die Richtigkeit der in einer Simulationsstudie gewonnenen Ergebnisse zu garantieren (vgl. Rabe 2008, S. 2). Dabei ist die V&V Bestandteil der Modellbildung, der Modellanwendung und der Ergebnisauswertung (vgl. Rabe 2008, S. 2). Rabe, Spieckermann und Wenzel (Rabe 2008) definieren die Verifikation und Validierung wie folgt:

Verifikation ist die Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde. (Rabe 2008, S. 14)

Validierung ist die kontinuierliche Überprüfung, ob die Modelle das Verhalten des abgebildeten Systems hinreichend genau wiedergeben. (Rabe 2008, S. 15)

Balci beschrieb die Verifikation und Validierung vereinfacht mit den Fragestellungen „Are we creating the X right?“ (Balci, S. 150) und „Are we creating the right X?“ (Balci, S. 150).

Im Rahmen dieser Arbeit kamen unterschiedliche Verifikations- und Validierungsmethoden zum Einsatz, welche entlang des Modellierungsprozesses, der Simulation und der Ergebnisauswertung durchgeführt wurden. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Techniken kann Rabe (2008, S. 96) entnommen werden. Es folgt eine kurze Darstellung der in dieser Arbeit überwiegend eingesetzten V&V-Techniken.

Animation & Monitoring

Die eingesetzte Simulationssoftware verfügt über die Möglichkeiten zur Animation des aktuellen Materialflusses und der Ablauflogik. Es können die räumlichen Veränderungen der Materialflusselemente, die unterschiedlichen Zustände von Objekten sowie auch die zeitliche und ereignisdiskrete logische Abarbeitung der Programmstruktur beobachtet werden. Die Animation ermöglicht, durch die Beobachtung sowie den Vergleich der zeitlichen Abläufe mit Erwartungswerten Fehler im Modellverhalten zu erkennen (vgl. Rabe 2008, S. 95). Beim Monitoring werden Werte und Zustände sichtbar gemacht. Dies kann über einen definierten Zeitraum oder zu bestimmten Zeitpunkten oder Ereignissen stattfinden. Die Übereinstimmung der aktuellen Situation des Simulationsmodells mit den visualisierten Werten kann damit überprüft werden (vgl. Rabe 2008, S. 101).

Festwerttest & Grenzwerttest

Die Überführung eines stochastischen Modelles in ein deterministisches Modell kann durch die Vorgabe fester Modellparameter erfolgen. Dadurch ist es möglich, im Vorfeld einfache Hypothesen bezüglich des Gesamtmodells aufzustellen und diese zu überprüfen (vgl. Rabe 2008, S. 99). Eine ähnliche Aussagekraft besitzt ein Grenzwerttest, bei welchem, durch die Vorgabe von Extremwerten, das Ergebnis der Simulation in Form einer Hypothese formuliert und überprüft wird (vgl. Rabe 2008, S. 100).

Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse untersucht den Einfluss der Variation von Eingabeparametern auf die Auswirkungen der Ausgabeparameter. Kommt es zu sehr starken Veränderungen der Ausgangsparameter bei kleinen Änderungen der Eingangsparameter, kann von einem „sensitiven Parameter“ ausgegangen werden, welcher einer genaueren Untersuchung bedarf (vgl. Rabe 2008, S. 103).

Test von Teilmodellen

Ein Test von Teilmodellen kann erfolgen, wenn die reale Systemstruktur mit der des Modells hinreichend genau übereinstimmt und das Gesamtmodell hierarchisch aus einzelnen Teilmodellen aufgebaut ist (vgl. Rabe 2008, S. 106). Ziel des Tests ist die Überprüfung der Teilmodelle mit den realen Teilsystemen hinsichtlich ihrer Übereinstimmung. Häufig sind die Teilmodelle alleinstehend nicht ausführbar; in diesem Fall wird eine Testumgebung entwickelt, in welcher die Ausführung der Modelle erfolgt. Jedoch kann anhand einer erfolgreichen Überprüfung der Teilmodelle keine Aussage hinsichtlich der Genauigkeit des Gesamtmodells getroffen werden (vgl. Rabe 2008, S. 106).

Vergleich mit aufgezeichneten Daten

Existiert ein reales System, welches dem Modell entspricht, kann mithilfe von historisch aufgezeichneten Eingangs- und Ausgangsdaten das Modell überprüft werden. Erfolgt aufgrund fehlerhafter Simulationsergebnisse eine Anpassung des Modells, muss zur Gültigkeitsbestimmung eine erneute Prüfung erfolgen. Diese Prüfung muss jedoch mit anderen Eingangs- und Ausgangsdaten erfolgen, da die Verwendung der ursprünglich eingesetzten Daten systematische Fehler enthalten können, welche sich anschließend auch im Modell wiederfinden. (vgl. Rabe 2008, S. 111).

5.3 Systembeschreibung

Bevor auf die Beschreibung der Teilmodelle eingegangen wird, erfolgt die Systembeschreibung der Produktionsumgebung. In diesem Teilabschnitt soll ein zusammenhängendes Verständnis über das Zusammenspiel aller Teilmodelle im Gesamtmodell vermittelt werden.

Bei dem untersuchten Produktionsstandort handelt es sich um eine Einzelteil- und Komponentenfertigung, welche Zahnräder und Wellen für die Getriebeherstellung produziert. Abbildung 5.1 zeigt den zugehörigen vereinfachten Produktionsablauf.

Am Anfang der Produktionslinie werden verschiedene Rohmaterialien bereitgestellt. Diese wurden bereits in vorgelagerten Prozessschritten bearbeitet oder stehen als Kaufteil mit einem entsprechenden Vorfertigungsgrad zur Verfügung. Die Zahnräder haben einen Schmiedeprozess mit nachgelagerter Wärmebehandlung sowie eine mechanische Vorbearbeitung durchlaufen. Die Wellen sind mithilfe eines Drehprozesses an den Stirn- und Laufflächen vorgefertigt. Die Rohmaterialien werden entsprechend ihres Bauteiltyps den verschiedenen Produktionslinien zugeordnet. Die Produktion mit ihren unterschiedlichen Produktionslinien wird in die Bereiche der

Räder- und **Wellenfertigung** unterschieden, wobei in der Räderfertigung verschiedene Schalträder, Festräder und Antriebsräder sowie in der Wellenfertigung verschiedene Antriebswellen hergestellt werden. Zusätzlich kann die Produktion entlang des Materialflusses in drei weitere Abschnitte unterteilt werden. Der erste Abschnitt ist die **Grünfertigung**. In diesem werden die Bauteile als Rohmaterialien angeliefert und es erfolgt die Formgebung bis nahe der Endkontur. In der Grünfertigung werden ausschließlich ungehärtete Bauteile bearbeitet. Anschließend an die Grünfertigung gelangen die Bauteile in den Wärmebehandlungsprozess. In der **Härtere**i erhalten die Bauteile ihre endgültigen Werkstoffeigenschaften und gelangen anschließend als gehärtete Bauteile in die **Hartfertigung**. In diesem Produktionsabschnitt erfolgt die Formgebung der Endkontur. Die Hartfertigung besitzt aus diesem Grund meist höhere Anforderungen an die Fertigungstoleranzen als die Grünfertigung. Bei der Produktion handelt es sich um eine Großserienfertigung mit einem hohen Automatisierungs- und Vernetzungsgrad. Die Produktion ist für einen 3-Schichtbetrieb ausgelegt und fertigt im 1.600 Getriebe pro Tag.

Bauteile

- SR1-7 Schaltrad 1-7
- SRR Schaltrad Rückwärtsgang
- ZA Zahnrad Antriebswelle
- ZR Zahnrad Ritzelwelle
- FR4-5 Festrad 4-5
- AW1-2 Antriebswelle 1-2
- AWQ Antriebswelle Quadro
- AQF Antriebswelle Front

- F/E Fräsen/Entgraten
- D Drehen
- ES Elektrodenstrahlschweißen
- W Waschen
- RG Räumen grün
- WL Walzen
- AF Axialformen
- RI Richten

- H Honen
- DH Hartdrehen
- SL Schleifen LF
- SK Schleifen Kegel
- K Kennzeichnen
- IR Innen Räumen
- HV Honen Verzahnung
- SV Schleifen Verzahnung
- ST Festigkeitsstrahlen
- SA Schleifen Außen
- SI Schleifen Innen
- HL Honen LV
- FI Finieren
- WS Wälzschleifen

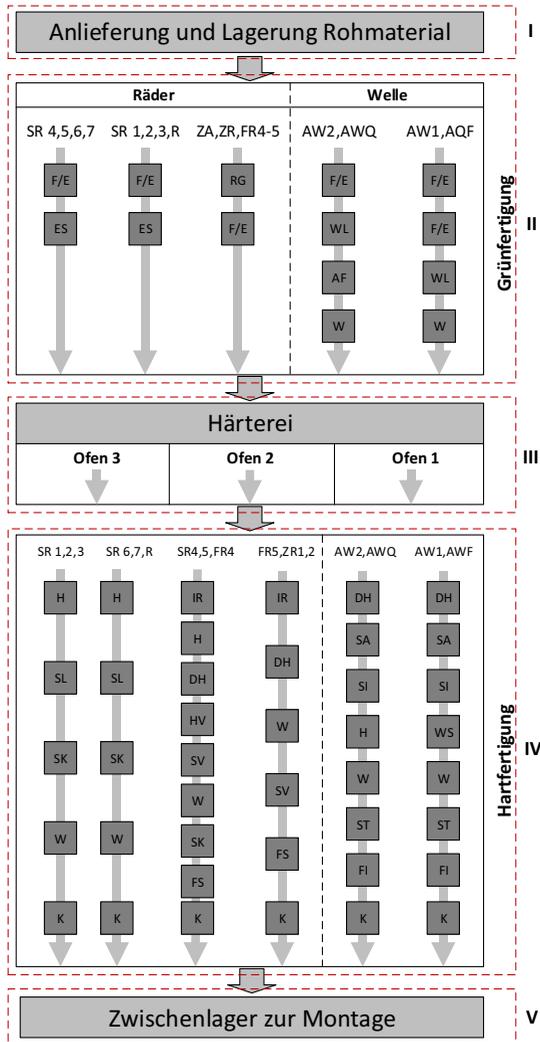


Abbildung 5.1: Fertigungsablauf der Bauteilfertigung

Im Bereich I der in Abbildung 5.1 dargestellten Produktion befinden sich die Anlieferung und die Lagerung der Rohmaterialien. Die Rohmaterialien werden in einem Logistikbereich angeliefert und anschließend entsprechend des Bauteiltyps auf vorgesehenen Flächen im Kopfbereich der Grünfertigung zwischengelagert. Die Lagerung geschieht nach dem FIFO-Prinzip, wobei die Menge der gelagerten Teile davon abhängt, wie viele Getriebe die Montage pro Zeiteinheit liefern muss.

Zu Produktionsbeginn werden die Rohmaterialien durch Mitarbeiter oder Flurförderfahrzeuge aus den Zwischenlagern entnommen und in die Beladungszone im Bereich II der Grünfertigung befördert.

Die Beladung der einzelnen Produktionslinien im Bereich der Grünfertigung kann durch einen Mitarbeiter oder einen Roboter erfolgen. Bei der Beladung durch den Mitarbeiter werden in definierten zeitlichen Intervallen immer mehrere Werkstückträger mit Bauteilen bestückt. Im Gegensatz dazu erfolgt die Beladung durch den Roboter zyklisch kontinuierlich in einem festgelegten Intervall. Für den Transport der Bauteile zu den einzelnen Bearbeitungsstationen wird ein Transfersystem verwendet. Dieses besteht aus einem Kettenfördersystem, auf welchem es aufgrund von Haftreibung zwischen Werkstückträger und Förderkette, zur Mitnahme des Förderhilfsmittels kommt. Die Werkstückträger sind staufähig und arbeiten nach dem Prinzip einer ungetakteten Reihenfertigung. Die Wegsteuerung funktioniert mithilfe eines Identifikationssystems, welches in Abhängigkeit des Bauteiltyps die zugehörigen Bearbeitungsstationen anfährt. Das Transfersystem verbindet alle in der Produktionslinie enthaltenen Bearbeitungsstationen, wobei nicht alle sich in der Produktionslinie befindenden Bearbeitungsstationen zwangsweise von jedem Bauteiltyp angefahren werden. Vor jeder Bearbeitungsstation wird geprüft, ob sich das auf dem Werkstückträger befindende Bauteil für den Prozess bestimmt ist und ob die Einfahrbedingungen erfüllt sind. Ist dies der Fall, erfolgt die Bearbeitung. Ansonsten wird der Bearbeitungsprozess übersprungen und das Bauteil gelangt wieder auf das Transfersystem.

Wurden bei einem Bauteil im Bereich II alle Bearbeitungsschritte vollzogen, gelangt es an das Ende der Grünfertigung, wo es in einem Staubereich auf dem Verkettungssystem auf seine Entnahme wartet. Analog zur Beladung am Kopf der Grünfertigung werden je nach Bauteiltyp die Bauteile zyklisch kontinuierlich mithilfe eines Roboters oder in größeren Stückzahlen von einem Mitarbeiter entnommen. Die entnommenen Bauteile werden auf Härteroste umgeladen und gelangen anschließend in die Härterei, welche als Bereich III gekennzeichnet ist. Der Transport der gestapelten Härteroste zu den Härteöfen erfolgt mithilfe von Flurförderfahrzeugen oder durch einen Mitarbeiter.

Bei dem Härteprozess handelt es sich um einen Chargenprozess, bei welchem immer eine bestimmte Anzahl an Bauteilen gleichzeitig bearbeitet wird. In der Härterei durchlaufen die Bauteilchargen verschiedene Behandlungsphasen. Der eigentliche Behandlungsprozess geschieht im Niederdruck. Zu Beginn werden die Bauteile in einer Erwärmungsphase aufgeheizt. Anschließend erfolgt das Aufkohlen der Bauteile durch Zugabe von Acetylen. Nach der

Diffusionsphase werden die Bauteile mithilfe von Helium abgeschreckt. Abschließend werden die Bauteile bei ca. 160 °C angelassen, um Eigenspannungen abzubauen. Nach dem Härteprozess gelangen die Bauteilchargen mithilfe von Flurförderfahrzeugen oder durch Mitarbeiter in die Anlieferungszone der Hartfertigung, welche als Bereich IV gekennzeichnet ist.

Die Be- und Entladung des Verkettungssystems und der Transport der Bauteile zu den Bearbeitungsstationen erfolgt analog zur Grünfertigung. Nach der Entnahme der Bauteile am Ende der Hartfertigung werden die Bauteile verpackt und im Bereich V zwischengelagert. Je nach Bedarf der anschließenden Montagelinie erfolgt aus diesem Zwischenlager die Versorgung der Montagelinie mit Bauteilen.

5.4 Modellierung des Transfersystems

Das eingesetzte Transfersystem besteht aus modular aufgebauten Standardkomponenten mit definierten Funktionen. Die Grundfunktion eines Transfersystems sind Bewegungsprozesse und Lagerungsprozesse (vgl. Grundig 2012, S. 116). Zu diesen zählen das Transportieren und Handhaben wie auch das Lagern, Sammeln, Verteilen und Sortieren von Bauteilen (Vgl. Arnold und Furmans 2007, S. 1). Ein beliebig aufgebautes Transfersystem für eine Produktionslinie kann aus den Einzelmodellen des Transfersystems zusammengesetzt werden. Dieses ist für eine exemplarische Fertigungslinie in Abbildung 5.2 dargestellt.

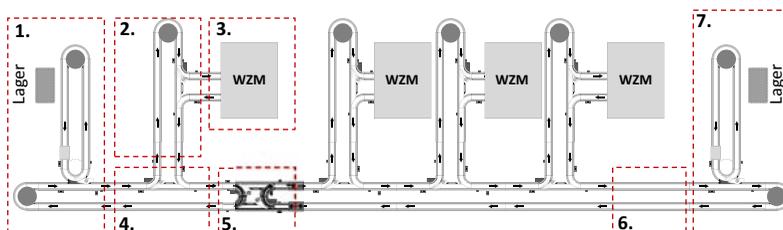


Abbildung 5.2: Einzelmodule des Transfersystems einer Produktionslinie

Die Teilsysteme übernehmen im Materialflusssystem folgende Hauptaufgaben:

- Teilsystem 1 Die Teilebereitstellung versorgt die Produktionslinie mit Bauteilen (Quelle)
- Teilsystem 2 Der Maschinenpuffer versorgt die Maschine mit Bauteilen (Fördern, Puffern)
- Teilsystem 3 Die Maschine bearbeitet die Bauteile
- Teilsystem 4 Die Maschinenzuführung verteilt die Bauteile zu den Maschinen (Fördern, Sortieren, Verteilen)

- Teilsystem 5 Die Wendestation verkürzt die Transportwege im Transfersystem (Sortieren, Verteilen)
- Teilsystem 6 Die Förderstrecken befördern die Bauteile (Fördern, Puffern)
- Teilsystem 7 Die Teileentnahme entnimmt die Bauteile aus der Produktionslinie (Senke)

5.4.1 Materialflusssteuerung

Die linieninterne Materialflusssteuerung basiert auf dem Steuerungsverfahren „*Local Control*“. Alle entwickelten Teilmodelle arbeiten auf Grundlage dieser Steuerungsmethode, sodass eine Erweiterung oder Änderung am Gesamtsystem keine spezifische Anpassung der Teilmodelle erfordert.

Für die Materialflusssteuerung werden jedem Bauteil Tags zugeordnet, welche Informationen über den Bauteiltyp, den Bestimmungsort und die Arbeitsfolge enthalten. Die Tags bzw. Informationen werden auf einem Transponder gespeichert und über den gesamten Transportweg auf dem Bauteil mitgeführt.

Im Zuge der Beladung der Werkstückträger mit Bauteilen werden der Typ des Rohmaterials, der erste Bearbeitungsprozess und die Arbeitsfolge auf den Transponder geschrieben. Mithilfe des Ident-Systems, welches an jedem Verteilpunkt des Transfersystems installiert ist, erfolgt das Lesen und Schreiben der Tags. Trifft ein Werkstückträger auf einen Verteilpunkt im Transfersystem, wird dieser gestoppt, die Informationen des Tags gelesen und anschließend zu seinem entsprechenden Ziel weitergeleitet. Hat ein Bauteil seinen Zielprozess erreicht, erfolgt nach der Bearbeitung entsprechend der Arbeitsfolge eine neue Zielvorgabe, welche auf dem Transponder gespeichert wird (vgl. Abbildung 5.3).

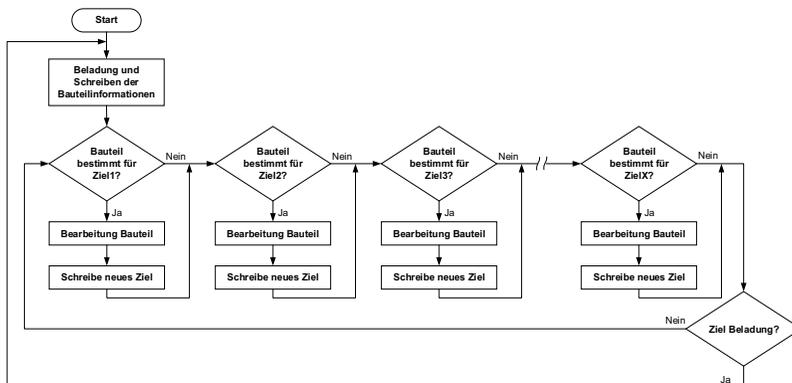


Abbildung 5.3: Vereinfachter Funktionsablaufplan der Materialflusssteuerung

Die gesamte Flusssteuerung erfolgt dezentral an den einzelnen Verteilpunkten. Vereinfacht dargestellt, beschränkt sich die Abfrage in den Knotenpunkten auf das anzufahrende Ziel des Bauteils. Die einzelnen Teilmodelle benötigen für die Materialflusssteuerung lediglich die Bezeichnung des Ziels, welches sie mit Bauteilen versorgen.

5.4.2 Teilebereitstellung und Teileentnahme

Die Steuerungsmethoden der Teilebereitstellung und der Teileentnahme sind bis auf geringe Unterschiede identisch. Die Hauptunterschiede sind, dass die Teilebereitstellung als Bauteilquelle und die Teileentnahme als Bauteilsenke dienen. Es folgt nur die Darstellung der Funktionsweise der Teilebereitstellung.

Die Teilebereitstellung arbeitet als Bauteilquelle und versorgt die Produktionslinie und die dazugehörigen Maschinen mit Bauteilen. Die Rohmaterialien werden in einem Lager in unmittelbarer Nähe zum Verkettungssystem zwischengelagert und durch einen Mitarbeiter oder Roboter auf einem Werkstückträger im Transfersystem befördert. Auf dem Hauptband und dem Umlaufsystem befinden sich Näherungssensoren, die das Vorbeifahren eines Werkstückträgers registrieren, ein Ident-System, welches Bauteilinformationen abfragt und Steuerungselemente, welche die Bauteile vereinzeln. Durch die Steuerung einer Weiche können Werkstückträger von dem Hauptband in das Umlaufsystem eingeschleust werden (vgl. Abbildung 5.4).

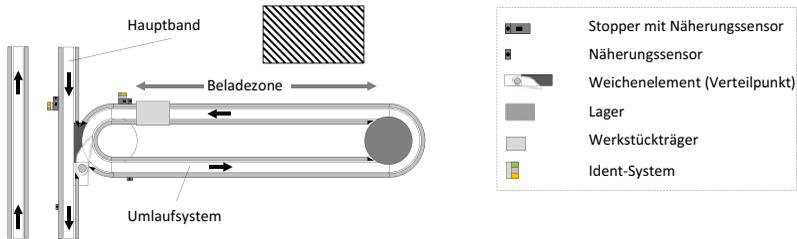


Abbildung 5.4: Modell der Teilebereitstellung

Für die Beladung der Werkstückträger werden diese in der Beladungszone aufgestaut und anschließend gezielt auf das Hauptband ausgeschleust. Nachdem die Bauteile alle Bearbeitungsprozesse durchlaufen haben, erfolgt in der Teilebereitstellung die erneute Bestückung der Werkstückträger mit Bauteilen.

Lagersteuerung

Das dargestellte Lager ist ein Zwischenlager, welches durch die zentrale Planungsebene anhand von Sollbeständen und Bedarfsanforderungen aus einem Zentrallager beliefert wird. Die Größe des Lagers, der eingelagerte Rohteiltyp, der Zeitpunkt des Auffüllens des Lagers (zyklisch oder zu definierten Ereignissen) und die angelieferte Anzahl an Rohmaterialien je Lagerfüllung wird in der Lagersteuerung parametrisiert.

Einfahrtssteuerung/Ausfahrtssteuerung

Das Ident-System prüft, ob der eintreffende Werkstückträger zur Einfahrt in die Beladungszone bestimmt ist. Ist dies der Fall, wird zusätzlich geprüft, ob der Werkstückträger leer ist und ob die maximale Anzahl an möglichen, sich zeitgleich in der Teilebereitstellung befindenden Bauteile nicht überschritten ist. Sind die Einfahrtsbedingungen erfüllt, erfolgt das Einschleusen des Werkstückträgers. Werden die Einfahrtsbedingungen nicht erfüllt, wird der Werkstückträger an der Teilebereitstellung vorbeigeführt. Zudem wird vor jedem Ein- oder Ausschleusen eines Werkstückträgers geprüft, ob der Weichenbereich frei ist. Stehen während des Ein- oder Ausschleusens mehrere Werkstückträger zur Einfahrt bzw. Ausfahrt bereit, erfolgt die Vorrangsteuerung nach dem FIFO-Prinzip, bei welcher der Warenträger Vorrang hat, der zuerst im Weichenbereich eingetroffen ist. Parametrisiert werden kann, welche Bauteiltypen in die Teilebereitstellung einfahren können.

Beladungssteuerung

Die Beladung der Werkstückträger kann nach zwei unterschiedlichen Mechanismen erfolgen. Das Modell kann den Ablauf der Beladung der Werkstückträger sowohl durch einen Roboter als auch durch einen Mitarbeiter darstellen.

Die Beladung durch den Mitarbeiter erfolgt zyklisch in einem normalverteilten Intervall. Das Beladungsintervall simuliert den Beladungszyklus des Mitarbeiters. Der Mitarbeiter kontrolliert in zyklischen, zeitlich vorgegebenen Intervallen, ob Wareenträger zum Beladen zur Verfügung stehen und belädt diese, wenn Teile im Lager vorhanden sind. Dabei werden alle Wareenträger, die sich zu Beginn des Beladungsintervalls in der Teilebereitstellung befinden, beladen. Der Mitarbeiter benötigt für die Beladung eine definierte Zeitspanne. Sind alle Wareenträger, beladen, wird die Zeit des Beladungsintervalls neu berechnet und die Beladung ist für die Dauer des Beladungsintervalls unterbrochen. Die Beladung durch den Mitarbeiter kann hinsichtlich der Länge und der Standardabweichung des Beladungsintervalls und der Beladungsgeschwindigkeit des Mitarbeiters parametrisiert werden.

Die Beladung der Werkstückträger durch einen Roboter erfolgt im Gegensatz zur Beladung kontinuierlich durch einen Mitarbeiter. Sind Bauteile im Lager vorhanden, werden diese kontinuierlich auf die Werkstückträger umgelagert. Parametrisierbar ist die Beladungsgeschwindigkeit des Roboters je Bauteil.

Übergeordnet können beide Beladungsvarianten, sowie auch die Lagersteuerung für definierte Zeiträume zu definierten Zeiten unterbrochen werden. Damit ist es möglich, Störungen in der Materialversorgung des Transfersystems darzustellen.

5.4.2.1 Maschinenzuführung und Maschinenpuffer

Die Teilmodelle der Maschinenzuführung und des Maschinenpuffers versorgen die Maschine (WZM) kontinuierlich mit Bauteilen. Dabei wird das Teilmodell des Maschinenpuffers über das Teilmodell der Maschinenzuführung mit Bauteilen versorgt. Die Maschinenzuführung überprüft ankommende Werkstückträger hinsichtlich des Bauteiltyps und dessen Bearbeitungsstatus. Ist ein Bauteil für den an die Maschinenzuführung angebotenen Prozess bestimmt, wird das Bauteil eingeschleust. Die Maschinenzuführung verfügt im Weichenbereich über ein Ident-System sowie Näherungssensoren, welche die Bauteilidentifikation ermöglichen (vgl. Abbildung 5.5).

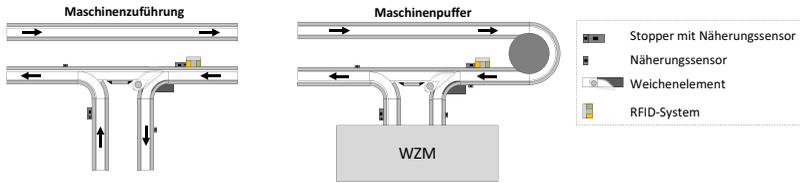


Abbildung 5.5: Modelle der Maschinenzuführung und des Maschinenpuffers

Im Maschinenpuffer werden die ankommenden Bauteile aufgestaut. So ist sichergestellt, dass die Maschine im regulären Produktionsablauf kontinuierlich mit Bauteilen versorgt ist. Bevor ein Bauteil in die Maschine einfährt, erfolgt eine zusätzliche Bauteilprüfung. Ist das Bauteil für die Maschine bestimmt, wird es bearbeitet, andernfalls erfolgt das Ausschleusen auf das Hauptband.

Nach der Bearbeitung in der Maschine wird dem Bauteil ein neues Ziel zugewiesen. In Abhängigkeit der Arbeitsfolge ist das der Name des nächsten Bearbeitungsprozesses oder der Teileentnahme.

5.4.3 Förderstrecken und Wendestationen

Die Förderstrecken und Wendestationen sind reine Transportelemente, welche dazu dienen, die Bauteile zu den Maschinen zu befördern. Das Teilmodell der Förderstrecken beinhaltet verschieden lange Segmente und Kurven, welche in Abhängigkeit des zu modellierenden Gesamtsystems Anwendung finden. Die Förderstrecken beinhalten keine Sensorik und keine Steuerungslogik (vgl. Abbildung 5.6).

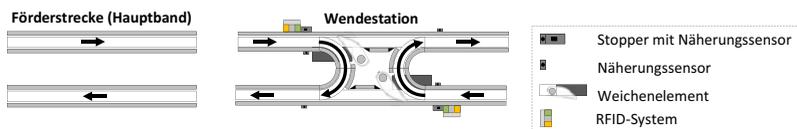


Abbildung 5.6: Modelle der Förderstrecken und Wendestation

Die Wendestation verfügt beidseitig über ein Ident-System und Näherungssensoren. Mithilfe dieser erfolgt die Steuerung des Weichenbereichs. Die Aufgabe der Wendestation besteht darin, durch das Rückführen von Bauteilen die Transportwege zu verkürzen und bei Bedarf einzelne Bereiche des gesamten Transfersystems abzukoppeln.

5.4.4 Fördergut und Förderhilfsmittel

Auf den einzelnen Produktionslinien können unterschiedliche Bauteiltypen gefertigt werden. Für jeden Bauteiltyp existiert im Gesamtmodell ein eigenes Fördergut, welches dem Bauteiltyp entspricht. Die Bauteile werden auf Förderhilfsmitteln (Werkstückträger) zu den einzelnen Maschinen transportiert. Dabei ist jedem Bauteil eine eigene unveränderliche Seriennummer zugeordnet.

Die Werkstückträger sind mit Transpondern ausgestattet, welche die erforderlichen Bauteilinformationen zur Materialflusssteuerung enthalten. Diese enthalten die Seriennummer des Bauteils, welches sich auf dem Werkstückträger befindet, eine unveränderliche WagenID sowie den Zielort und die Arbeitsfolge des Bauteils. Die Seriennummer des Bauteils, der Zielort und die Arbeitsfolge werden über die gesamte Prozesskette vom Bauteil vererbt. Das heißt, wird ein Bauteil auf einen anderen Warenträger umgelagert, übernimmt der Warenträger die dem Bauteil zugewiesenen Attribute. Die WagenID hingegen ist dem Warenträger zugeordnet und bleibt erhalten.

5.5 Modellierung der Maschinen

Das Modell der Maschinen ermöglicht die energetische Bilanzierung verschiedener Abschaltstrategien für geplante und ungeplante Unterbrechungen im Produktionsablauf. Dies erfolgt durch die Modellierung der Leistungs- und Medienbedarfsverläufe, welche den unterschiedlichen Maschinenzuständen zugewiesen sind. Das Modell unterscheidet acht Betriebszustände sowie vier Abschaltstrategien.

5.5.1 Methoden der energetischen Maschinenmodellierung

Die kombinierte Simulation von Material- und Energiefluss kann als eine etablierte Methode zur energetischen Analyse, Auslegung und Bewertung von Fertigungssystemen bezeichnet werden. Der Schwerpunkt liegt auf der Modellierung der Leistungsbedarfe der Maschinen und Anlagen. Die Erweiterung der klassischen Materialflusssimulation durch die Integration energetischer Funktionen, wie z.B. das Hinterlegen der elektrischen Leistungsaufnahme je Betriebszustand, wurde in aktuellen Simulationsumgebungen bereits umgesetzt. Die Abbildung der Leitungs- und Medienbedarfe kann je nach angewandter Methode im Detailierungsgrad stark variieren. Eberspächer (2013, S. 641) unterteilt für seine zustandsbasierte Simulation den Energiebedarf nach Betriebszuständen. In seiner Methode erweitert er die Darstellung um die energetische Zuordnung der Leistungsbedarfe der einzelnen Maschinenkomponenten zum Gesamtbedarf (vgl. Abbildung 5.7).

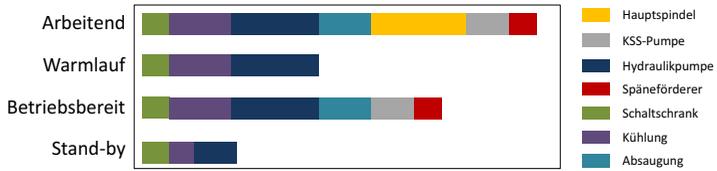


Abbildung 5.7: Energiebedarfe einer WZM auf Komponentenebene (Eberspächer und Verla 2013)

Junge (2007, S. 76) beschreibt zur Modellierung der Energiebedarfe die stückweise Zerlegung und lineare Approximation gemessener Energieprofile. Mithilfe ereignisbestimmter Start- und Endbedingungen erfolgt so die Integration der Leistungsfunktionen zur Energiebedarfsberechnung (vgl. Abbildung 5.8).

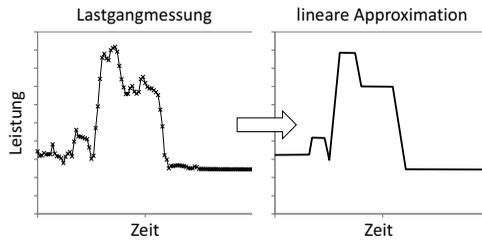


Abbildung 5.8: Lineare Approximation eines Energieprofils

Je nach Auflösung der gemessenen Energieprofile kann auch eine zeitdiskrete Zuordnung der Leistungswerte erfolgen (vgl. Abbildung 5.9). Mithilfe eines Kennfelds kann für jede Zeitschrittweite der momentane Leistungsbedarf bestimmt werden. Im Gegensatz zu der von Junge beschriebenen Methode erfolgt keine Approximation über gesamte Teilabschnitte des Energieprofils.

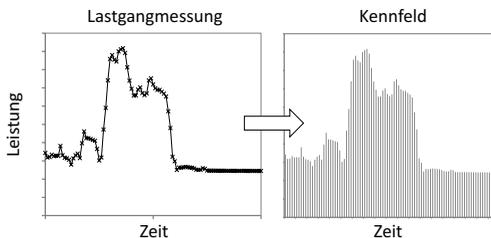


Abbildung 5.9: Zeitdiskrete Zuordnung des Energieverlaufs

Auch kann die Methode der zeitdiskreten Zuordnung um die von Junge beschriebene Approximation erweitert werden. So ist es möglich, auch zeitkontinuierliche Modelle zu erstellen.

Weinert (2010, S. 61–65) beschreibt eine zu Junge ähnliche Methode, bei welcher Energieprofile einer Maschine in Energieblocks zerlegt werden (vgl. Abbildung 5.10).

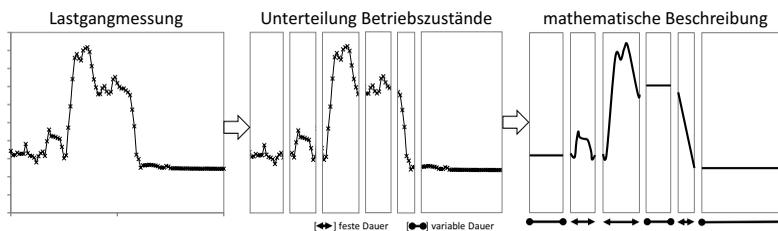


Abbildung 5.10: Zerlegung eines Energieprofils in Energieblocks

Die Zerlegung des Energieprofils erfolgt anhand der Betriebszustände, sodass jedem Zustand ein spezifisches Energieprofil zugewiesen werden kann. Weiter erfolgt eine Einteilung in zeitkonstante und zeitvariable Prozessschritte. So zeigen beispielsweise die Warmlaufphase und die Bearbeitungsphase einen zeitkonstanten Verlauf, wohingegen ein Wartebetrieb einen zeitvariablen Verlauf aufweist.

Zusätzlich zu der energetischen Bestimmung der Leistungsbedarfe, anhand von gemessenen Energieprofilen, können die elektrischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften einer Maschine durch die physikalische Modellierung der einzelnen Subsysteme der Maschine bestimmt werden. Der Energiebedarf einer Werkzeugmaschine ist dominiert durch die elektrische Leistungsaufnahme der Antriebssysteme. Diese kann in physikalischen elektro-mechanischen Modellen abgebildet werden (vgl. Zirn und Weikert 2006, S. 59–71). Eine vereinfachte Methode

zur physikalischen Simulation beschreibt Götze (Neugebauer 2010, S. 169) im Kontext mit der energetischen Bilanzierung und Bewertung von Werkzeugmaschinen.

5.5.1.1 Methodenwahl der energetischen Maschinenmodellierung

Für die Aufgaben der in Kapitel 6 beschriebenen Potenzialanalyse kann keine pauschale Aussage bezüglich einer generell gültigen Methode getroffen werden. Vielmehr kommt eine Kombination der vorherig beschriebenen Methoden zum Einsatz. Ziel der Methodenwahl ist, es universelle Teilmodelle zu erzeugen, mit denen auch sehr große Fertigungssysteme abgebildet werden können. Um dies zu erreichen, muss ein Kompromiss zwischen dem Detaillierungsgrad und der zu verarbeitenden Datenmenge bzw. der Modellgeschwindigkeit gefunden werden. Wird z.B. für die Auswertung nur die kumulierte Arbeit benötigt, so kann auf eine detaillierte zeitliche Auflösung der Lastverläufe verzichtet werden. Soll die Auswertung um das Auftreten von Lastspitzen erweitert werden, muss sich auch der Detaillierungsgrad im Lastverlauf erhöhen. Aufgrund der Vielzahl der untersuchten Prozesse und Maschinen ist eine physikalische elektro-mechanische Modellierung jedes einzelnen Prozesses nicht zielführend. Messungen haben gezeigt, dass selbst baugleiche Maschinen, welche unterschiedliche Bauteile produzieren, stark voneinander abweichende Lastverläufe aufzeigen. Um diese Effekte in physikalischen Modellen abzubilden, sind für die Parametrisierung meistens Messungen erforderlich. So ergibt sich beispielsweise die Leistungsaufnahme eines Antriebssystems aus dem Produkt von Drehzahl und Drehmoment. Das Drehmoment ist wiederum zum Teil abhängig vom bearbeiteten Material und dem Zustand des Werkzeugs. Die energetische Vermessung der Maschinen und Anlagen stellt somit das effizientere Werkzeug zur Lastgangermittlung dar. Auf eine physikalische Modellierung der Maschinen wird deshalb in dieser Arbeit verzichtet.

5.5.2 Betriebszustände der Maschine und deren Energieniveaus

Abbildung 5.11 zeigt das Energieniveau einer Werkzeugmaschine in Abhängigkeit des jeweiligen Betriebszustands. Es ist zu erkennen, dass das Energieniveau stark vom jeweiligen Betriebszustand abhängt. Für die Modellbildung werden folgende Betriebszustände in Anlehnung an das VDMA Einheitsblatt 34179 unterschieden, welche in Abhängigkeit der jeweiligen Stand-by-Strategie angefahren werden.

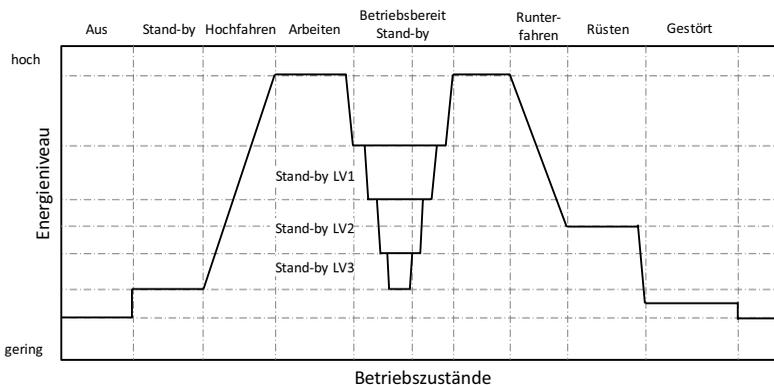


Abbildung 5.11: Betriebszustände von Werkzeugmaschinen nach VDMA Einheitsblatt 34179

Die Maschine wird als aus bezeichnet, wenn sich der Hauptschalter der Maschine in der Position *aus* befindet. Es werden nur noch Aggregate mit Strom versorgt, welche vor dem Hauptschalter angeschlossen sind. Diese sind in der Regel maschinenunabhängige Komponenten wie z.B. Netzwerktechnik, Schaltschrankbeleuchtung und die Klimatisierung oder Medien- und Strommesstechnik.

Im *Stand-by-Betrieb* besitzt die Maschine ein wesentlich geringeres Energieniveau als in den Zuständen *Betriebsbereit* und *Bearbeitung*. Je nach Maschine und der für einen Stand-by-Betrieb zur Verfügung stehenden Zeit können verschiedene Stand-by-Modi mit unterschiedlichen Ausprägungen hinsichtlich der Absenkung des Energieniveaus existieren. Der Wechsel vom Zustand *Stand-by* in den Zustand *Betriebsbereit* oder *Arbeitend* ist meist mit einer *Hochlaufphase* verbunden.

In der *Hochlaufphase* erfolgt die Überführung der Maschine in einen betriebsbereiten Zustand. Dabei kann es sich z.B. um den Warmlauf von Maschinenkomponenten handeln. Ist die Maschine *Betriebsbereit*, kann ohne zeitliche Verzögerung in den Zustand *Arbeitend* gewechselt werden, in welchem die Maschine i.O.-Teile produziert. Wird eine Maschine aus dem betriebsbereiten Zustand oder dem arbeitenden Zustand in die Zustände *Stand-by*, *Rüsten*, *Gestört* oder *Aus* versetzt, bedingt dies meist eine *Nachlaufphase*.

Beindet sich eine Maschine im Zustand *Gestört*, liegt vorübergehend ein undefinierter energetischer Zustand vor. Meist ist der Energiebedarf jedoch kleiner oder gleich dem Zustand *Betriebsbereit*. Im Zustand *Rüstend* erfolgt meist ein Werkzeugwechsel, der Energiebedarf ist meist gleich oder kleiner dem Zustand *Betriebsbereit*.

5.5.3 Abschaltstrategien der Werkzeugmaschinen

Kommt es zu einer Pause im Produktionsprozess, kann die Unterbrechung genutzt werden, um die Maschine in einen energie- und ressourcensparenden Betriebszustand zu versetzen. Das Modell beinhaltet zur Abbildung dieses Verhaltens vier unterschiedliche Abschaltstrategien, welche sich hinsichtlich der Aktivierung, der Nutzung der Pausenlänge und der angefahrenen Betriebszustände unterscheidet. Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht der Eigenschaften der verschiedenen Abschaltstrategien.

Tabelle 5.1: Integrierte Abschaltstrategien der Maschinenmodelle

	Bezeichnung	Aktivierung	Geplante Pausen	Ungeplante Pausen	
				Lang	Kurz
Abschaltstrategie 1	Ohne Stand-by	-	Betriebsbereit	Betriebsbereit	Betriebsbereit
Abschaltstrategie 2	Mitarbeiter Stand-by	manuell	Stand-by	Betriebsbereit	Betriebsbereit
Abschaltstrategie 3	Auto-Stand-by	automatisch	Stand-by	Stand-by	Betriebsbereit
Abschaltstrategie 4	Stand-by-Manager	Leitsystem	Stand-by	Stand-by	Stand-by

Die erste Abschaltstrategie ist nach eigenen Untersuchungen im heutigen Produktionsumfeld weit verbreitet. Es handelt sich um die Abschaltstrategie mit der geringsten Ausprägung hinsichtlich des effizienten Einsatzes von Energie und Ressourcen. Die Maschine wird zu Produktionsbeginn in einen betriebsbereiten Zustand versetzt und auch in geplanten und ungeplanten Pausen in diesem belassen. Diese Betriebsweise bietet den Vorteil, dass Ausbringungsverluste aufgrund von Hochlaufphasen vermieden werden.

Moderne Werkzeugmaschinen verfügen meist über die Möglichkeit, in Pausenzeiten einen Stand-by-Betrieb einzunehmen. Diese Möglichkeit ist in der zweiten Abschaltstrategie implementiert. Das Anfahren sowie auch das Verlassen des Stand-by-Betriebs erfolgt dabei manuell durch das Eingreifen in die Maschinensteuerung von einem Mitarbeiter. Bedingt durch den erhöhten organisatorischen Aufwand für den Mitarbeiter wird diese Betriebsweise überwiegend bei langen geplanten Pausen eingesetzt. Ungeplante Unterbrechungen finden hingegen keine Berücksichtigung.

Die dritte Abschaltstrategie sieht den automatischen Wechsel in geplanten und langen ungeplanten Pausen vor. Erhält die Maschine für eine vordefinierte Zeit keine Bauteile zur Bearbeitung, erfolgt der automatische Wechsel in einen Stand-by-Betrieb. Stehen wieder Bauteile für die Bearbeitung bereit, wechselt die Maschine selbstständig in den betriebsbereiten Zustand. Dieses Abschaltkonzept bietet den Vorteil, dass auch längere ungeplante Pausen für einen Stand-

by-Betrieb genutzt werden. Nachteilig hingegen ist, dass durch lange Hochlaufphasen die Ausbringung der Maschine verringert werden kann. Zusätzlich ist bei diesem Konzept nicht bekannt, wann das nächste Bauteil für die Bearbeitung zur Verfügung steht. Deshalb kann es passieren, dass ein Wechsel der Betriebszustände zeitlich eng beieinanderliegt und somit keine Verringerung des Energie- und Ressourceneinsatzes erfolgt.

In der vierten Abschaltstrategie erfolgt die Verwendung des in Kapitel 3 entwickelten Stand-by-Managers. Das Leitsystem übermittelt der Maschine kontinuierlich ein Zeitsignal, welches die Information beinhaltet, wann das nächste Bauteil für die Produktion bereitsteht. Mithilfe des Stand-by-Managers können sowohl geplante als auch lange und kurze ungeplante Pausen für einen Stand-by-Betrieb genutzt werden.

Modellierung der Leistungs- und Medienbedarfsverläufe

Die Leistungs- und Medienbedarfsverläufe der Maschine sind an den aktuellen Maschinenzustand gekoppelt. Das Modell ermöglicht die Bilanzierung der Kühlschmierstoff-, der Kühlwasser- und Druckluftbedarfe sowie der elektrischen Leistung. Deren Berechnung erfolgt anhand zeitlich aufgelöster Leistungs- und Medienbedarfsverläufe, welche in Abhängigkeit der Simulationsschrittweite in diskreten Intervallen hinterlegt sind. Dabei wird die integrale Form (vgl. Abbildung 5.7), sowie die kennfeldbasierte Form (vgl. Abbildung 5.9) verwendet. Die Kennfelder entsprechen in ihrer Länge der Periode des jeweiligen Betriebszustands.

5.6 Gesamtmodell des Fertigungssystems

Die Modellierung des Gesamtmodells erfolgt mithilfe der entwickelten standardisierten Maschinenmodelle sowie der Einzelmodelle des Transfersystems. Ziel ist es, das in Kapitel 5.3 beschriebene Fertigungssystem hinreichend genau abzubilden.

Die Grundlage der Modellbildung zeigt die in Abbildung 5.12 in Auszügen dargestellte Systemanalyse. Diese beinhaltet die räumlichen Abmessungen der einzelnen Linien, die Arbeitsfolgen jedes Bauteiltyps, deren Linienzuordnung sowie weitere Materialfluss relevante Angaben (Taktzeiten, Stückzahlen, Maschinenverfügbarkeiten, Rüstzeiten, usw.).

Arbeitsfolge													
Linie	Bauteil	Grünfertigung				Linie	Hartfertigung						
1	AW1	F	F	WL	W	6	D	S	H	S	W		
1	AWF	F	F	WL	W	6	D	S	H	S	W		
2	AW2	F	F	AF	W	7	D	S	S	H	H	W	
2	AWQ	F	F	WL	AF	W	7	D	S	S	H	S	W
3	FR4	R	F			9	R	D	S	W			
3	FR6	R	F			8	D	W	S	ST	W		
3	ZA,AB	R	F			8	R	D	S	ST	W		
3	ZR,RW	R	F			8	R	D	S	ST	W		
4	SR4	F	ES			9	H	H	S	W			
4	SR5	F	ES			9	H	H	S	W			
4	SR6	F	ES			10	H	S	S	W			
4	SR7	F	ES			10	H	S	S	W			
5	RG	F	ES			10	H	S	S	W			
5	SR1	F	ES			11	H	S	S	W			
5	SR2	F	ES			11	H	S	S	W			
5	SR3	F	ES			11	H	S	S	W			

Legende	
	Gruppe 1
	Gruppe 2
	Gruppe 3
	Gruppe 4
	Gruppe 5
	Gruppe 6
F	Fräsen
WL	Walzen
W	Waschen
AF	Axialformen
R	Räumen
ES	Schweißen
US	Prüfen
D	Drehen
S	Schleifen
H	Honen

Abbildung 5.12: Systemanalyse der Arbeitsfolgen und deren Linienzuordnung

Der Bereich der Grünfertigung enthält ca. 40 Maschinen. Diese sind auf einer Fläche von 60 m x 60 m in fünf Produktionslinien angeordnet. Die Hartfertigung erstreckt sich auf einer Fläche von ca. 95 m x 60 m und beinhaltet, aus ca. 80 Maschinen in sechs unterschiedlichen Produktionslinien. Insgesamt besteht das Fertigungssystem ca. 120 energetisch relevanten Maschinen, aufgeteilt in 11 verschiedene Produktionslinien mit 18 unterschiedlichen Bauteiltypen.

5.6.1 Vereinfachungen des Gesamtmodells

Der in Kapitel 3 entwickelte Stand-by-Manager ist für das Produktionsumfeld einer mechanischen Fertigung konzipiert. Auf die Modellierung der Montagebereiche sowie der Härteprozesse wird deshalb verzichtet.

Die Systemanalyse zeigt, dass unterschiedliche Bauteiltypen identische oder sehr ähnliche Arbeitsfolgen besitzen (vgl. Abbildung 5.12). Bauteile mit gleicher Arbeitsfolge werden auf derselben oder einer in Bezug auf die geometrischen Abmessungen sehr ähnlichen Produktionslinien gefertigt.

Die Abbildung des Gesamtsystems erfolgt deshalb in definierten Gruppen. Diese beinhalten ein allgemeingültiges Linienmodell, welches bauteilspezifisch angepasst wird. Auf jedem Linienmodell werden zwischen zwei und vier unterschiedliche Bauteiltypen gefertigt. Auf die Modellierung von

Maschinen, welche keine Relevanz in Bezug auf den Energiebedarf als auch den Materialfluss haben, wird verzichtet. Zu diesen Prozessen zählen zum Teil das Kennzeichnen, das Bürsten sowie einige Prüfverfahren. Der Aufbau des Gesamtmodells der exemplarischen Produktionslinie 11 ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

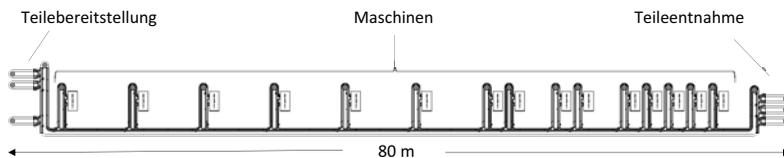


Abbildung 5.13: Gesamtmodell der Produktionslinie 11

Die Produktionslinie 11 verarbeitet drei unterschiedliche Bauteiltypen, welche in vier Prozessschritten bearbeitet werden. Jedem Bauteiltyp sind fünf Maschinen zugeordnet, welche in Abhängigkeit der Arbeitsfolge durchlaufen werden. Insgesamt verfügt die Produktionslinie über drei Teilebereitstellungen und Teileentnahmen sowie 15 Maschinen, welche auf einer Länge von ca. 80 m in der Produktionshalle verteilt sind.

Kapitel 6

Potenzialanalyse anhand von Szenarien

Mit dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Gesamtmodell bzw. den einzelnen Linienmodellen erfolgt die Untersuchung verschiedener Produktionssteuerungsmethoden in unterschiedlichen Produktionssituationen hinsichtlich ihres Stand-by-Betriebs. Ziel ist es, am Beispiel einzelner Produktionslinien einer Getriebeproduktion, das energetische Einsparpotenzial verschiedener Abschaltstrategien von Werkzeugmaschinen zu ermitteln. Der Fokus liegt auf der energetischen Bewertung des in Kapitel 3 entwickelten Stand-by-Managers. Im ersten Abschnitt erfolgt die Darstellung der Randbedingungen und Produktionsparameter des Fertigungssystems. Nach deren Beschreibung folgt die Erläuterung der untersuchten Simulationsszenarien mit anschließender Diskussion der Ergebnisse.

Für eine differenzierte Analyse, erfolgt das Zusammenfassen einzelner Fertigungslinien zu prozessgleichen bzw. prozessähnlichen Gruppen. Die in Kapitel 3.3.3 gewonnenen Ergebnisse zeigen diesbezüglich eine klare Abgrenzung zwischen den eingesetzten Prozessen der Grün- und Hartfertigung. Die Grünfertigung enthält überwiegend Fräsprozesse, wohingegen die Hartfertigung durch Schleif- und Honprozesse dominiert wird. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt anhand einer ausgewählten Referenzlinie der Hartfertigung. Die Potenzialstudie umfasst fünf Szenarien, in welchen die Variation relevanter Produktionsparameter erfolgt. Ausgehend von einem Basisszenario, welches die *energetische Ausgangsbasis* darstellt, werden unterschiedliche *Abschaltstrategien* auf Maschinenebene untersucht. Damit ist es möglich, unterschiedliche Energiemanagementkonzepte der Maschinen zu berücksichtigen. Die Gesamtleistung des Fertigungssystems kann durch die Variation der vorgegebenen Produktionszahlen beeinflusst werden. Untersucht wird der *konjunkturbedingte* Einfluss von sinkenden zu produzierenden

Stückzahlen auf die Auswirkung des Energiebedarfs. Das Auftreten von Unterbrechungen im Produktionsablauf hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Untersucht wird der Einfluss unterschiedlicher *Maschinenverfügbarkeiten* und der damit einhergehenden Störzeiten sowie das Auftreten *organisatorisch bedingter Unterbrechungen* im Materialfluss. Ob eine Pause für einen Stand-by-Betrieb genutzt werden kann, hängt maßgeblich von deren Länge ab. Das auftretende Pausenspektrum wird hinsichtlich Länge und Häufigkeitsverteilung variiert.

6.1 Basisszenarien

Die Szenarien B0 und B1 stellen die Basisszenarien dar, welche im Ausgangsszenario B0 die energetische Bewertungsgrundlage festlegen und im Szenario B1 die unterschiedlichen Abschaltstrategien der Maschinen berücksichtigen. In allen weiteren Szenarien werden, ausgehend vom Basisszenario B0, einzelne Parameter variiert und es erfolgt eine Berechnung mit allen in Szenario B1 definierten Abschaltstrategien.

6.1.1 Energetische Ausgangsbasis

Das energetische Einsparpotenzial für einen Stand-by-Betrieb ist maßgeblich von der zur Verfügung stehenden Zeit abhängig. Vereinfacht gilt, je schlechter ein Fertigungssystem arbeitet, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Anzahl an Maschinenstillständen zunimmt. Die relevanten Einflussfaktoren, welche zu Unterbrechungen im Produktionsprozess führen, zeigt Abbildung 6.1..



Abbildung 6.1: Die sechs Verlustbringer der OEE-Kennzahl (vgl. Erlach 2010, S. 71)

Ausschlaggebend für die Potenzialermittlung ist das Verhältnis der nutzbaren Betriebszeit zur gesamten Arbeitszeit. Der Qualitätsgrad spielt keine Rolle, da notwendige Nacharbeiten oder Ausschussteile i.d.R. keinen Maschinenstillstand erzeugen.

Eine weitere wichtige Kenngröße ist der Auslastungsgrad. Dieser beschreibt die durchschnittliche Auslastung aller dem Fertigungssystem oder der Produktfamilie zugeordneten Prozesse und bildet sich aus der Summe der Quotienten der jeweiligen Prozesszykluszeiten (ZZ_i) und dem Kundentakt (KT) (vgl. Erlach 2010, S. 110).

$$AG = \frac{1}{n} \cdot \sum_n^{\text{Prozesse } n} \frac{ZZ_i}{KT_i} \cdot 100 \quad (6.1)$$

Der Kundentakt beschreibt dabei das Verhältnis der täglichen Arbeitszeit (AZ) zum Tagesbedarf der zu fertigenden Bauteile (TB).

$$KT = \frac{AZ}{TB} \quad (6.2)$$

Eine wichtige Grundvoraussetzung für die Bestimmung des Kundentakts ist die Wahl der Systemgrenze. Diese erfolgt anhand der zugrundeliegenden gebildeten Produktfamilien aus Kapitel vgl. 5.6..

6.1.2 Szenario B0: Ausgangsbasis

Dieses Szenario repräsentiert die energetische Ausgangsbasis eines nach dem Stand der Technik aufgebauten Fertigungssystems, welches in einem Drei-Schicht-Betrieb mit 17 Schichten in der Woche arbeitet. Die Tagesleistung der Getriebeproduktion beträgt 1600 Einheiten. In den planmäßigen Schichten erfolgt auch bei längeren Unterbrechungen keine Überführung der Maschinen in einen Stand-by-Betrieb. In geplanten Freischichten wird der Maschinenpark heruntergefahren. Die Grundlast in Freischichten ist sehr gering und beträgt durchschnittlich 300 W je Maschine, was in etwa der Leistungsaufnahme der Maschinensteuerung entspricht. Die durchschnittliche Maschinenverfügbarkeit (betrachtet werden nur Störungen) einer Einzelmaschine beträgt zw. 95 % und 99 %. Das Teilespektrum ist begrenzt. Jeder zu fertigende Bauteiltyp wird auf fest vorgegebenen Maschinen gefertigt. Ein Rüstvorgang erfolgt nur, wenn ein Werkzeug seine Verschleißgrenze erreicht hat. Die Einzelprozesse einer Linie sind in ihrer Bearbeitungszeit eng aufeinander abgestimmt. Die statistische und zeitliche Verteilung des Auftretens von Unterbrechungen im Materialfluss erfolgt anhand von Realdaten für jede Linie.

6.1.2.1 Ergebnisdarstellung Szenario B0

Die Analyse der Ergebnisse erfolgt exemplarisch für das Liniendesign der in Kapitel 5.6 beschriebenen Produktionslinie 11 der Hartfertigung.

Bei einem idealen Fertigungssystem produzieren alle Prozesse synchron mit der gleichen Taktzeit im Kundentakt und es kommt zu keinen Unterbrechungen. Diese Arbeitsweise ist in einer realen Produktion nur annähernd zu erreichen. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die nutzbare Bearbeitungszeit für jeden Prozess der betrachteten Fertigungslinie zeigt Abbildung 6.2.

Die als ideal gekennzeichneten Daten beschreiben einen Produktionsablauf ohne Unterbrechungen, Rüstvorgänge und Störungen. Es ist zu erkennen, dass sich die sechs Schleifprozesse ca. 99 % der Arbeitszeit in Bearbeitung befinden. In der Arbeitsfolge besitzen diese Prozesse die längste Taktzeit und stellen somit den Engpass der Produktionslinie dar. Entsprechend der Taktzeitdifferenz sinken die Auslastungen aller vor- und nachgelagerten Prozesse mit kürzeren Taktzeiten. Die durchschnittlich nutzbare Betriebszeit aller Maschinen beträgt im Idealfall ca. 92 % der gesamten Arbeitszeit.

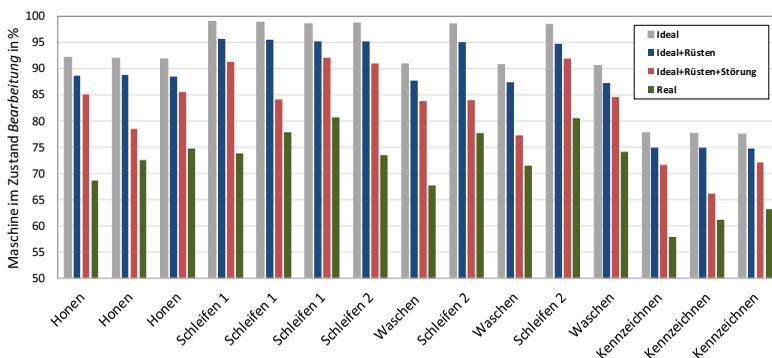


Abbildung 6.2: Nutzbare Bearbeitungszeiten der Produktionslinie 11

Durch die Berücksichtigung der erforderlichen Rüstvorgänge reduziert sich die nutzbare Betriebszeit der Schleifprozesse auf ca. 95 % und die durchschnittliche gesamte nutzbare Betriebszeit sinkt auf ca. 88 %. Eine Erweiterung der Betrachtung um auftretende Maschinenstörungen reduziert die nutzbare Betriebszeit der Engpassanlagen auf 89 % und die aller Prozesse auf ca. 82 %. Unter Einbeziehung realer Unterbrechungsstatistiken erfolgt eine weitere signifikante Reduktion der nutzbaren Betriebszeit auf durchschnittlich 70 % der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit.

Der produktspezifische Kundentakt des Fertigungssystems ist bestimmt durch die Anzahl der zu produzierenden Getriebe. Unter Vernachlässigung unterschiedlicher Varianten des Produkts

ergibt sich der Kundentakt zu 54 s. In dem Taktabstimmungsdiagramm aus Abbildung 6.3 ist ersichtlich, dass alle Maschinen der Produktionslinie den geforderten Kundentakt erreichen. Die mit *Ideal* gekennzeichneten Daten zeigen die von den einzelnen Maschinen erreichbaren Zykluszeiten für die Herstellung eines Bauteils. Der zweite Datensatz zeigt die Zykluszeiten, welche um die Anteile der Rüstvorgänge und Störungen erweitert sind. Alle Maschinen in der Produktionslinie erreichen den geforderten Kundentakt. Das Fertigungssystem besitzt zudem Überkapazitäten. Der Auslastungsgrad der gesamten Produktionslinie liegt ohne die Berücksichtigung von Störungen und Rüstvorgängen bei 65 %. Unter Hinzunahme dieser erhöht sich der Auslastungsgrad auf 72 %. Die sechs Schleifmaschinen mit der längsten Taktzeit erreichen einen Auslastungsgrad unter Berücksichtigung von Stör- und Rüstvorgängen von 78 %.

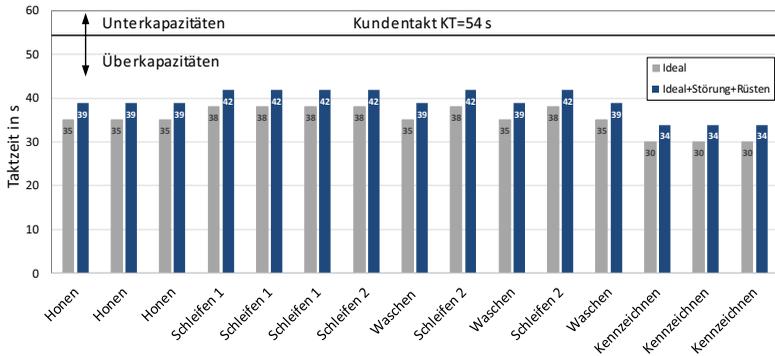


Abbildung 6.3: Taktabstimmungsdiagramm der Produktionslinie 11

Die Ergebnisse der energetischen Untersuchung sind in Abbildung 6.4 dargestellt. Ausgehend von dem beschriebenen Szenario B0 erfolgt die schrittweise Darstellung der einzelnen Einflussfaktoren. Die als *Ideal* gekennzeichneten Daten sind die Ausgangsbasis der energetischen Potenzialbewertung und zeigen den Energiebedarf zur Herstellung von 28145 Bauteilen, was einer Tagesleistung von 1655 Bauteilen je Produkt bei 17 Schichten in der Woche entspricht.

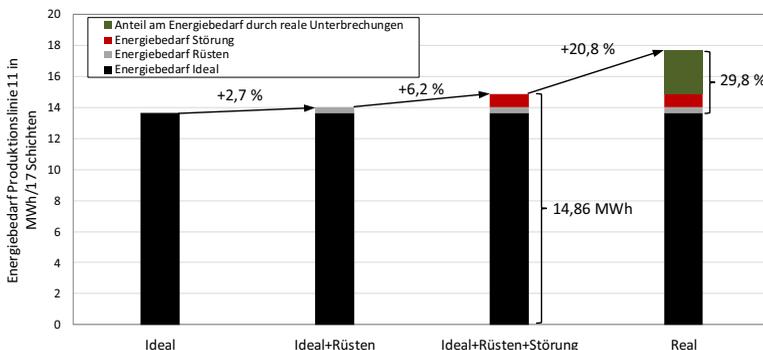


Abbildung 6.4: Einsparpotenzial der Produktionslinie 11

Der Energiebedarf der realen Fertigung liegt mit ca. 17,7 MWh ca. 30 % höher als der theoretisch benötigte Energiebedarf einer idealisierten Produktionslinie. Dabei werden 2,7 % des Energiebedarfs durch Rüstvorgänge und den daraus resultierenden Maschinenstillständen der vor- und nachgelagerten Prozesse verursacht. Weitere 6,2 % entfallen auf Maschinenstörungen. Für die Herstellung der erforderlichen Bauteile sind somit im Idealfall 14,86 MWh erforderlich.

Rüstvorgänge und Störungen verändern den Materialfluss und können dadurch den zeitlichen Anteil an Maschinenstillständen erhöhen. Der dafür aufzuwendende Energiebedarf resultiert somit indirekt aus den entstehenden Unterbrechungen. Zudem besitzt die Maschine im jeweiligen Zustand selbst einen Energiebedarf. Im untersuchten Fall werden ca. 4,15 % des Energiebedarfs durch eintretende Maschinenstillstände der vor- und nachgelagerten Prozesse verursacht. Die restlichen 4,75 % entstehen durch den erforderlichen Energiebedarf der Maschinen in den Betriebszuständen *Störung* und *Rüsten*. Befindet sich eine Maschine im Rüstvorgang oder in *Störung*, kann keine energetische Reduktion des Energiebedarfs durch einen Stand-by-Betrieb erfolgen, deshalb steht der Anteil als Potenzial nicht zur Verfügung. Unter der Einbeziehung realer Unterbrechungsstatistiken ist die tatsächlich aufzuwendende Energie zur Herstellung der Bauteile um 29,8 % höher als im Idealszenario.

Gesamtpotenzial

Allein aufgrund unterschiedlicher Taktzeiten besitzt die idealisierte reale Fertigungslinie nur eine durchschnittliche nutzbare Betriebszeit von 92 %. Aufgrund von Taktzeitdifferenzen entfallen 8 % der Arbeitszeit auf Kurzstillstände. Diese dauern häufig nur wenige Sekunden und können nicht für einen Stand-by-Betrieb genutzt werden. Das der Potenzialbewertung zugrundeliegende

Idealszenario berücksichtigt im Gegensatz zur Potenzialabschätzung in Kapitel 3.3.4 diese nicht bei der Bewertung der Potenziale.

Der Energiebedarf idealisierter Produktionslinien ist bei realen Produktionslinien nicht zu erreichen. Erforderliche Rüstvorgänge, Störungen und Unterbrechungen bei der Bauteilversorgung führen aufgrund von entstehenden Maschinenstillständen zu einem deutlich höheren Energiebedarf. Der Anteil des Energiebedarfs, welcher keine Wertschöpfung erbringt, liegt bei einem Drei-Schicht-Modell mit 17 Schichten in der Woche für die untersuchte Produktionslinie bei 4,06 MWh. Bezogen auf das Idealszenario, liegt der Energiebedarf somit um 29,8 % höher als theoretisch benötigt. Unter Berücksichtigung des nicht nutzbaren Anteils durch Störungen, beläuft sich das nutzbare Potenzial für einen optimierten Stand-by-Betrieb auf ca. 25 %, ausgehend von einer idealen Produktionslinie, welche Rüstvorgänge und Störungen beinhaltet.

Diese 25 %, welche als Potenzial für einen Stand-by-Betrieb genutzt werden können, entstehen durch Maschinenstillstände, bei denen sich die Maschinen in einem betriebsbereiten Zustand befinden.

Zur vollständigen Nutzung des Potenzials ist es erforderlich, die Maschinen gänzlich herunterzufahren. Dies ist, bedingt durch technische und organisatorische Restriktionen, nicht vollständig umsetzbar. Das technisch nutzbare Potenzial reduziert sich somit auf die energetische Differenz zwischen dem Energiebedarf des Maschinenzustands *Betriebsbereit* und den realisierbaren Stand-by-Betriebsarten.

Die in Kapitel 3.3 für das gesamte Fertigungssystem durchgeführte Maschinenanalyse an 92 Einzelmaschinen (vgl. Tabelle 6.1 & Abbildung 3.11) zeigt, dass der durchschnittliche Energiebedarf im Zustand *Betriebsbereit* im Vergleich zum arbeitenden Zustand noch ca. 73 % beträgt. Das Einnehmen eines Stand-by-Betriebs verringert den durchschnittlichen Anteil in Bezug auf den Zustand *Betriebsbereit* lediglich um weitere 10 %.

Tabelle 6.1: Durchschnittliche Energiebedarfe verschiedener Maschinen

Prozesse	Arbeitend	Betriebsbereit	Betriebsbereit/Arbeitend	Stand-by	Stand-by/Betriebsbereit
Schleifprozess	15,20 kW	11,00 kW	72,37 %	10,30 kW	93,64 %
Fräsprozess	5,60 kW	3,70 kW	66,07 %	3,00 kW	81,08 %
Honprozess	9,60 kW	4,40 kW	45,83 %	4,00 kW	90,91 %
Washprozess	13,30 kW	13,30 kW	100,00 %	13,30 kW	100,00 %
Drehprozess	4,20 kW	3,60 kW	85,71 %	3,56 kW	98,89 %
Schweißprozess	6,50 kW	4,00 kW	61,54 %	2,90 kW	72,50 %
			Ø 72%		Ø 90%

Es ist ersichtlich, dass durch die aktuell vorherrschenden klassischen Stand-by-Konzepte selbst im Idealfall nur ca. 10 % des Gesamtpotenzials genutzt werden. Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf des realen Systems entspricht das einer Reduktion um ca. 1,6 %.

Für die weitere Potenzialstudie erfolgt die Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten der Maschinen in Bezug auf realisierbare Stand-by-Konzepte. Diese wurden in Kapitel 4.6 entwickelt und hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit von den entsprechenden Maschinenlieferanten geprüft. Auf dieser Grundlage sowie der in Kapitel 3.3.3 durchgeführten Potenzialstudie erfolgt die Prognose, dass das technisch umsetzbare Potenzial je nach Fertigungsstruktur zw. 10 % und 50 % des zur Verfügung stehenden Gesamtpotenzials beträgt. Bezogen auf die vorliegende Untersuchung ist zu erwarten, dass sich der Gesamtenergiebedarf zwischen 3 % und 15 % reduzieren lässt.

6.1.3 Szenario B1: Variation der Abschaltstrategie

Dieses Szenario untersucht verschiedene maschineninterne Abschaltstrategien und deren Auswirkungen auf den erforderlichen Energiebedarf. Dazu werden die aus Szenario B0 definierten Randbedingungen bezüglich des Schichtbetriebs, des Teilespektrums, der Maschinenverfügbarkeit und der Unterbrechungen im Produktionsablauf beibehalten. Variiert werden die technischen Möglichkeiten des Energiemanagements der Maschinen. Betrachtet werden ein manuell eingeleiteter Stand-by-Betrieb (*Mitarbeiter Stand-by*), bei welchem ein Mitarbeiter die Maschine in einen Stand-by-Betrieb überführt, wenn bekannt ist, dass eine längere Pause (> 30 Minuten) ansteht, ein automatisch ausgeführter Stand-by (*Auto-Stand-by*), welcher die Maschine nach einer 15-minütigen Unterbrechung der Teileversorgung in einen Stand-by-Betrieb versetzt und der Stand-by-Betrieb, eingeleitet durch den *Stand-by-Manager*. Die Reaktivierung der Maschine aus dem Stand-by-Betrieb durch den *Mitarbeiter-Stand-by* und den *Stand-by-Manager* erfolgt rechtzeitig vor Beendigung der Pause. Eine Verringerung der Produktionsmenge entsteht bei diesen Stand-by-Strategien nicht. Der *Auto-Stand-by* beginnt die Maschinen hochzufahren, sobald Bauteile für die Bearbeitung bereitstehen. Bedingt durch die maschinenspezifischen Hochlaufzeiten kommt es bei dieser Strategie zu Ausbringungsverlusten.

6.1.4 Ergebnisdarstellung Szenario B1

Der Gesamtenergiebedarf und dessen prozentuale Verringerung bei der Anwendung verschiedener Abschaltstrategien ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Die energetische Ausgangsbasis bildet die in Szenario B0 beschriebene Produktionslinie und ist hier als Basis B0 definiert.

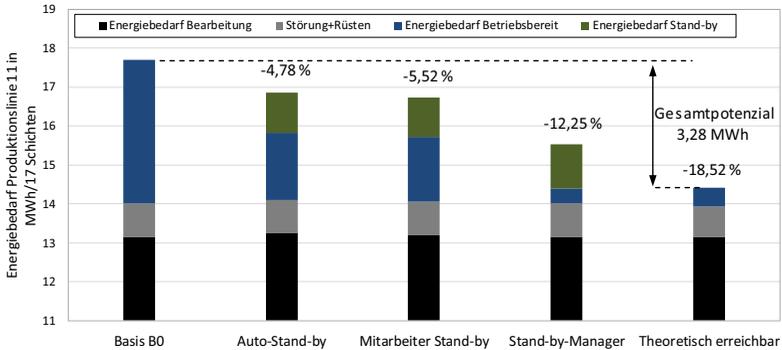


Abbildung 6.5: Potenziale der unterschiedlichen Einsparstrategien

Durch die Implementierung automatischer Abschaltstrategien ist es möglich, den Gesamtenergiebedarf von 17,7 MWh auf 16,86 MWh zu senken. Dies entspricht einer durchschnittlichen Reduktion von 4,78 %, wobei 25 % des Gesamtpotenzials genutzt werden. Zu berücksichtigen sind zudem auftretende Ausbringungsverluste, bedingt durch erforderliche Hochlaufzeiten. Der Ausbringungsverlust der untersuchten Produktionslinie liegt bei 339 Bauteilen, was einer Reduzierung von 1,2 % entspricht.

Das Einleiten des Stand-by-Betriebs durch einen Mitarbeiter verringert im Vergleich zum automatischen eingeleiteten Stand-by-Betrieb den Gesamtenergiebedarf nur unwesentlich, wohingegen durch den Einsatz des Stand-by-Managers eine weitere Absenkung auf 15,54 MWh stattfindet. In Bezug auf den theoretisch erreichbaren Energiebedarf werden durch den Einsatz des Stand-by-Managers ca. 66 % des bestehenden Potenzials genutzt. Hervorzuheben ist, dass durch die Nutzung des Stand-by-Manager eine prozentuale Verschiebung der Betriebszustände erfolgt. Aufgrund der hinterlegten Abschaltstrategien steigt der Anteil des Stand-by-Betriebs. Der Anteil des Bereitschaftsbetriebs sinkt hingegen. Die energetische Einsparung ist abhängig vom nutzbaren Anteil der Unterbrechungen, bedingt durch die Begrenzung der zur Verfügung stehenden Zeit befindet sich die Maschine zwar häufiger in einem Stand-by-Betrieb, jedoch ist die energetische Differenz zu dem Betriebszustand Betriebsbereit gering.

6.2 Erweiterungsszenarien

Die folgenden Szenarien basieren auf den Ausgangsszenarien und werden in den beschriebenen Parametern variiert. Für alle Szenarien erfolgt die Berechnung der im Basisszenario B1 beschriebenen Abschaltstrategien.

6.2.1 Szenario S1: Variation der Pausen

Die in einem Fertigungssystem auftretenden Unterbrechungen im Produktionsablauf können technisch und organisatorisch bedingt sein. In diesem Szenario wird ausgehend vom Basisszenario B0 untersucht, welchen Einfluss unterschiedliche Verteilfunktionen von auftretenden Unterbrechungen bei der Teilebereitstellung auf den Gesamtenergiebedarf bei verschiedenen Stand-by-Strategien haben.

Verteilfunktionen

Abbildung 6.6 zeigt die verschiedenen Verteilfunktionen der auftretenden Unterbrechungen im Bereich der Teilebereitstellung, welche in der Simulation Berücksichtigung finden. Die Gesamtdauer der entstehenden Unterbrechungen ist für alle Verteilfunktionen identisch, beträgt ca. 30 % der gesamten zur Verfügung stehenden Arbeitszeit und wurde mithilfe der in Kapitel 3.3 durchgeführten Analyse als Durchschnittswert ermittelt.

Die reale Pausenverteilung basiert auf den in Kapitel 3.3 erhobenen Daten und stellt das Basisszenario B0 dar. Die Unterbrechungsstatistik zeigt eine relativ gleichmäßige Verteilung der Pausen in den ersten Bereichen. Lange Pausen, welche länger als 55 Minuten andauern, sind mit ca. 33 % an der gesamten Unterbrechungszeit am häufigsten vertreten.

Der Datensatz der überwiegend langen Pausen repräsentiert eine Produktionslinie, bei welcher i.d.R. keine kurzen Pausen auftreten. Die Maschinen sind meistens sehr gut mit Bauteilen versorgt. Kommt es zu einer Unterbrechung, ist diese i.d.R. länger und wirkt sich auf den Materialtransport und die Maschinenauslastung aus.

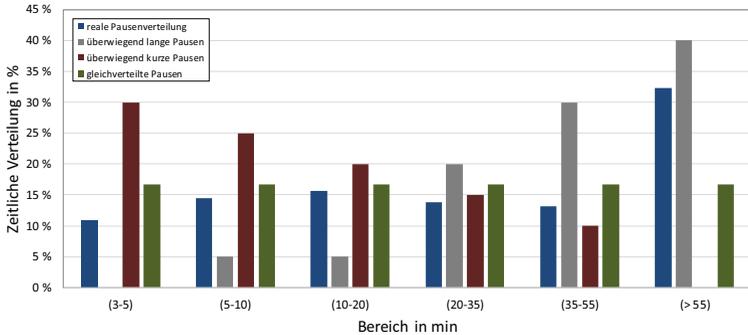


Abbildung 6.6: Verteilfunktionen der entstehenden Unterbrechung bei der Teilebereitstellung

Die Verteilung der überwiegend kurzen Pausen bildet eine Produktionslinie ab, welche kontinuierlich mit Bauteilen versorgt wird. Jedoch treten bei der Teileversorgung relativ häufig kurze Unterbrechungen auf. Lange Unterbrechungen, die zu signifikanten Störungen im Materialfluss führen, kommen selten vor.

Bei den gleichverteilten Unterbrechungen kommt es sowohl zu Kurzstillständen als auch zu langfristigen Maschinenstillständen. Der Verlauf ähnelt stark dem des realen Verteilungsbildes, jedoch dominieren die Langzeitpausen, nicht die Verteilung.

6.2.1.1 Ergebnisdarstellung Szenario S1

Die Simulationsstudie erfolgte für 17 Schichten, in denen ohne Freischichten produziert wurde. In Abhängigkeit der Unterbrechungsverteilungen können in begrenztem Maße verschieden viele Bauteile hergestellt werden. Die Auswirkungen auf die Ausbringungsleistung zeigt Abbildung 6.7. Im Basisszenario werden durchschnittlich 1656 Bauteile in 24 Stunden produziert. Die Ausbringungsmenge liegt über dem Kundenbedarf von 1600. Die Notwendigkeit zur Optimierung der Teileversorgung besteht nicht.

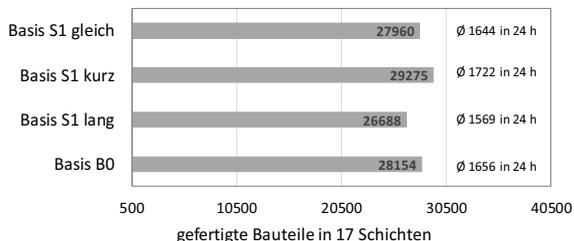


Abbildung 6.7: Ausbringungsleistungen für verschiedene Unterbrechungsverteilungen

Überwiegend lange Unterbrechungen führen zu einer Verschlechterung der Ausbringungsleistung. Der Kundenbedarf wird mit 1569 Bauteilen pro Tag nicht erreicht. Die Reduktion ist auf das Leerlaufen der Puffer und Förderstrecken zurückzuführen, sodass sich die effektiven Stillstandzeiten der Maschine bedingt durch Anfahrereffekte erhöhen. Kurze Pausen erreichen einen gegenläufigen Effekt. Die Anzahl der produzierenden Bauteile steigt auf durchschnittlich 1722 je 24 Stunden. Bei einer gleichlangen Pausenverteilung werden aufgrund der ähnlichen Verteilfunktion wie im Basisszenario B0 annähernd viele Bauteile produziert.

Die energetische Auswertung für überwiegend lange Unterbrechungen zeigt Abbildung 6.8. Ausgehend vom Basisenergiebedarf (Basis S1), welcher den Energiebedarf der realen Produktionslinie abbildet, sind die Auswirkungen verschiedener Abschaltstrategien dargestellt.

Die automatische Einleitung eines Stand-by-Betriebs nach einer 15-minütigen Unterbrechung reduziert den Energiebedarf auf 16,61 MWh (-5,21 %). Erfolgt das Einleiten des Stand-by-Betriebs organisatorisch durch einen Mitarbeiter, wird eine Verringerung auf 16,37 MWh (-6,92 %) erreicht. Übernimmt der Stand-by-Manager das Energiemanagement der Maschine, so reduziert sich der Energiebedarf auf 14,98 MWh (-14,9 %). Bezogen auf das Gesamtpotenzial werden durch den Auto-Stand-by 23 %, den Mitarbeiter Stand-by 31 % und den Stand-by-Manager 67 % des möglichen Gesamtpotenzials erreicht.

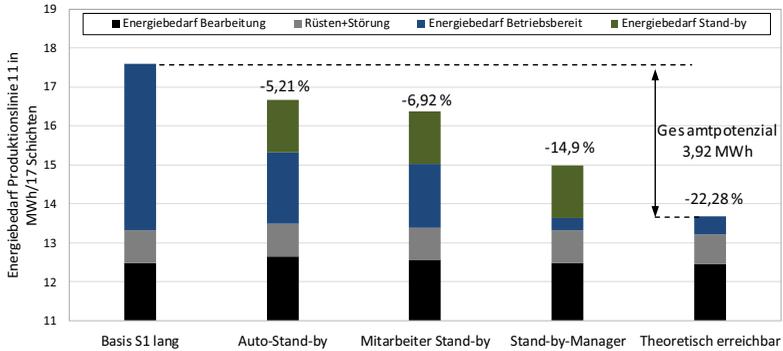


Abbildung 6.8: Energiebedarf verschiedener Stand-by-Strategien bei langen Unterbrechungen

Die Ergebnisse für überwiegend kurze Unterbrechungen zeigt Abbildung 6.9. Es ist ersichtlich, dass die Stand-by-Strategien *Auto-Stand-By* und *Mitarbeiter Stand-by* jeweils nur eine sehr geringe Reduktion von 0,67 % und 1,41 % des Gesamtenergiebedarfs erreichen.

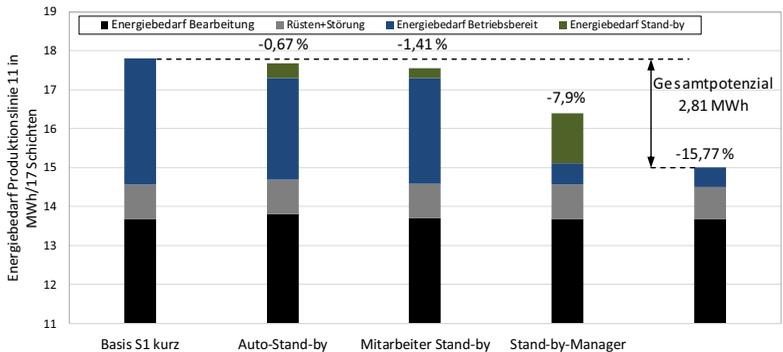


Abbildung 6.9: Energiebedarf verschiedener Stand-by-Strategien bei kurzen Unterbrechungen

Der Einsatz des *Stand-by-Managers* reduziert den Gesamtenergiebedarf um 7,9%. Hervorzuheben ist, dass eine starke Verschiebung der Betriebszustände erreicht wird. Ein Großteil der Unterbrechungen wird für einen Stand-by-Betrieb genutzt, jedoch ist die energetische Einsparung, bedingt durch die maschinenspezifischen Abschaltstrategien, gering. Das Gesamtpotenzial kurzer Unterbrechungen beträgt 2,81 MWh. Durch den Auto-Stand-by werden 4,2%, den Mitarbeiter Stand-by 8,9% und den Stand-by-Manager 50%, des bestehenden Potenzials ausgeschöpft.

Die Auswertung der Simulation für gleich lang verteilte Pausen zeigt Abbildung 6.10. Der Auto-stand-by verringert den Energiebedarf auf 17,19 MWh (-2,8 %). Das Gesamtpotenzial wird dabei zu 16 % ausgeschöpft. Der Mitarbeiter Stand-by erreicht eine Reduktion um 4,26 % auf 16,94 MWh, womit das Gesamtpotenzial zu 23 % genutzt wird. Der Einsatz des Stand-by-Managers senkt den aufzuwendenden Energiebedarf auf 15,64 MWh (-11,6 %), was eine Ausnutzung des Gesamtpotenzials von 63 % darstellt.

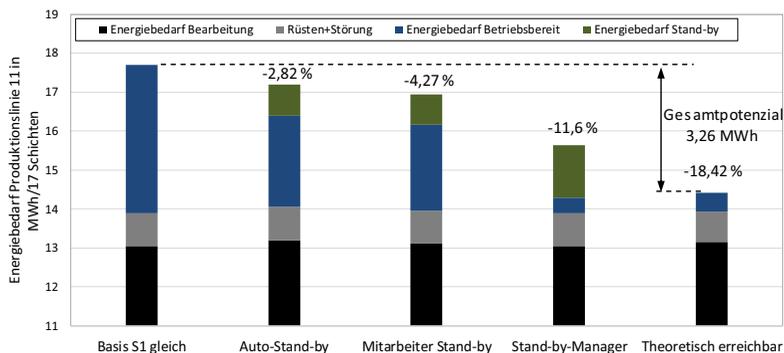


Abbildung 6.10: Energiebedarf verschiedener Stand-by-Strategien bei gleich langen Unterbrechungen

6.2.1.2 Ergebnisinterpretation Szenario S1

Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf des jeweiligen Basiswerts, besteht ein theoretisch erreichbares Einsparpotenzial zwischen 15,7 % und 22,3 %.

Alle Abschaltstrategien führten zu einer Absenkung des Energiebedarfs bei den untersuchten Unterbrechungsverteilungen. Die größte Reduktion des Energiebedarfs wird in allen Variationen durch den Einsatz des Stand-by-Managers erreicht. Die Nutzung des Gesamtpotenzials liegt bei dieser Abschaltstrategie zwischen 50 % und 67 %. Gefolgt vom Mitarbeiter Stand-by, welcher je nach Unterbrechungsverteilung zwischen 17 % und 46 % der durch den Stand-by-Manager erzielbaren Einsparungen erreicht. Der nach einer vordefinierten Zeit automatisch eingeleitete Stand-by erzielt durchschnittlich die geringste Reduktion des Energiebedarfs. Bezogen auf die erzielbaren Energiebedarfe durch den Einsatz des Stand-by-Managers werden zwischen 8,5 % und 39 % erreicht. Der automatische Stand-by verringert als einzige Stand-by-Strategie den Ausbringungsgrad der Produktionslinie. Dieser wird in den Szenarien *B0* um 1,2 %, *S1 lang* um 2,3 %, *S1 kurz* um 1,85 % und *S1 gleich* um 1,95 % verringert.

Bei einem gleichbleibenden zeitlichen Anteil der Unterbrechungen wirken sich Verteilfunktionen mit überwiegend langen Unterbrechungen positiv auf die absoluten erzielbaren Einsparungen in einem Stand-by-Betrieb aus. Durch das Einbeziehen des Gesamtpotenzials wird jedoch ersichtlich, dass durch lange Unterbrechungen der Gesamtenergiebedarf der Fertigungslinie zunimmt. Dieser Effekt kann durch die verringerte Maschinenauslastung begründet werden. Längere Unterbrechungen bei der Teilebereitstellung führen aufgrund des Leerlaufs der Produktionslinie zu einer Erhöhung der Maschinenstillstände aller nachgelagerten Prozesse. Die Maschinen befinden sich somit eine erhöhte Zeit im Maschinenzustand *Betriebsbereit* und können in der zur Verfügung stehenden Zeit weniger Bauteile produzieren. Die Ausbringungsleistung des Gesamtsystems, bezogen auf das Basisszenario *B0*, verringert sich im untersuchten Fall um ca. 5 %.

Den Energiebedarf je Bauteil der verschiedenen Unterbrechungsverteilungen für die verschiedenen Stand-by-Strategien zeigt Abbildung 6.11. Es ist erkennbar, dass lange Unterbrechungen bei allen untersuchten Abschaltstrategien zu einem Anstieg des aufzuwendenden Energiebedarfs führen.

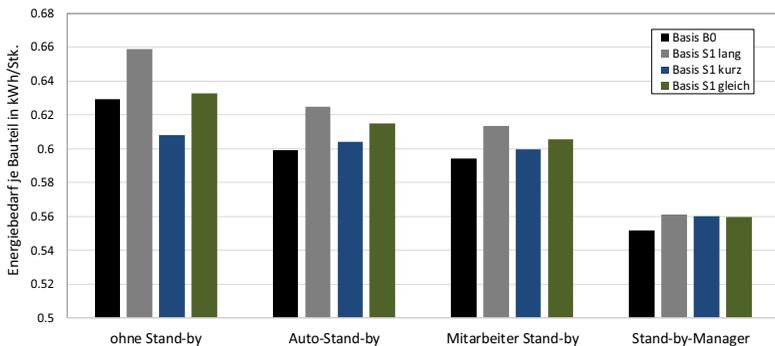


Abbildung 6.11: Energiebedarf je Bauteil bei verschiedenen Abschaltstrategien

Kurze Unterbrechungen hingegen erhöhen die Ausbringungsleistung der Produktionslinie und verringern den spezifischen Energiebedarf je Bauteil, wenn keine Abschaltstrategie genutzt wird. Bei überwiegend kurzen Pausen ist die erzielbare Einsparung durch einen *Auto-Stand-by* und den *Mitarbeiter Stand-by* sehr gering. Der Einsatz des *Stand-by-Managers* hingegen kann das Potenzial bei kurzen Unterbrechungen nutzen, sodass der spezifische Energiebedarf maßgeblich gesenkt wird. Die Kombination der realen Unterbrechungsverteilung mit dem Einsatz des Stand-by-

Managers liefert den geringsten Energiebedarf je Bauteil, wobei der geforderte Kundenbedarf von 1600 Bauteilen je 24 Stunden überschritten wird. Gleich verteilte Pausen liefern qualitativ einen ähnlichen Verlauf wie real verteilte Pausen, jedoch liegt der spezifische Gesamtenergiebedarf deutlich darüber.

Die Ergebnisse zeigen, dass in allen betrachteten Szenarien, unabhängig von der Unterbrechungsverteilung, jede Abschaltstrategie zu einer Senkung des Energiebedarfs führt. Lange Unterbrechungen können i.d.R. gut für einen Stand-by-Betrieb genutzt werden, führen aber zu einer Erhöhung des spezifischen Energiebedarfs je Bauteil. Potenziale, hervorgerufen durch kurze Unterbrechungen, werden bei der untersuchten Produktionslinie mit den verwendeten Abschaltstrategien auf Maschinenebene nur durch den Einsatz des *Stand-by-Managers* hinreichend genutzt. Bedingt durch die zeitlichen Vorgaben des *Auto-Stand-by* und *Mitarbeiter Stand-by* werden diese Zustände nur sehr selten eingenommen und es kommt zu keiner signifikanten Reduktion des Energiebedarfs.

6.2.2 Szenario S2: Variation des Kundenbedarfs

Die Darstellung eines veränderlichen Kundenbedarfs erfolgt durch die schrittweise Verringerung der geforderten Ausbringungsmenge des Fertigungssystems bei gleichbleibender zur Verfügung stehender Arbeitszeit. Die tägliche Ausbringung wird ausgehend vom Basisszenario B0 schrittweise von 1600 Bauteilen auf 1440 (-10 %) und anschließend auf 1280 (-20 %) Bauteile je 24 Stunden gesenkt. Der verringerte Kundenbedarf führt zu einer Absenkung des Auslastungsgrads der Produktionslinie. Die Anpassung der Ausbringungsmenge erfolgt durch eine Änderung der Beladungssteuerung. Die Produktionslinie wird weiterhin kontinuierlich durch einen Roboter beladen, jedoch wird der Beladungszyklus verlängert, sodass weniger Bauteile in die Produktionslinie gelangen.

Große Schwankungen im Kundenbedarf werden in der Praxis meistens durch eine Anpassung der Schichtmodelle, Arbeitszeiten und Anzahl der eingesetzten Mitarbeiter kompensiert. Auf die Untersuchung verschiedener Schichtmodelle und Arbeitszeiten wird verzichtet, da gut organisierte Produktionen in Freischichten in der Lage sind, gesamte Fertigungsbereiche herunterzufahren. Ein energetisches Einsparpotenzial ist somit im Idealfall nicht vorhanden.

6.2.2.1 Ergebnisdarstellung Szenario S2

Für verschiedene Ausbringungsmengen der Produktionslinie sind die spezifischen Energiebedarfe in Abbildung 6.12 dargestellt. Der spezifische Energiebedarf steigt durch die Verringerung der Ausbringungsleistung von 0,63 kWh/Stk. für 1600 Bauteile auf 0,8 kWh/Stk. für 1280 Bauteile. Das

entspricht einer Steigerung des Energiebedarfs von 27 % bezogen auf die Ausbringungsmenge von 1600 Bauteilen. Mit sinkender Bauteilanzahl steigt bei allen Stand-by-Strategien der nutzbare Anteil des energetischen Gesamtpotenzials. Die energetischen Einsparungen des *Auto-Stand-by* und des *Mitarbeiter Stand-by* liegen für die verringerten Ausbringungsmengen mit durchschnittlich 6,6 % eng beieinander. Der Einsatz des *Stand-by-Managers* reduziert den Gesamtenergiebedarf bei 1440 Bauteilen um 16 % und bei 1280 Bauteilen um 17,8 %.

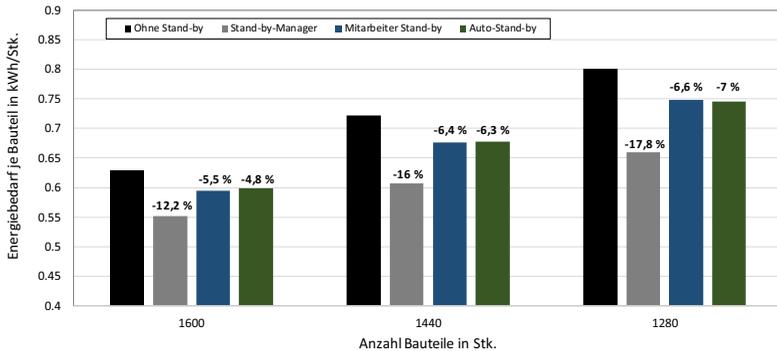


Abbildung 6.12: Energiebedarf je Bauteil bei verschiedenen Ausbringungsleistungen

Ergebnisinterpretation

Der mit sinkender Ausbringungsmenge steigende spezifische Energiebedarf resultiert aus einem erhöhten Anteil des Maschinenzustands *Betriebsbereit*. Dies ist durch die geringere Bauteilversorgung der Produktionslinie zu begründen. Maschinenstörungen und Unterbrechungen bei der Teilebereitstellung verursachen, bedingt durch die geringere Anzahl an Bauteilen in den Maschinenpuffern und auf dem Hauptband, schneller einen Teilmangel an den Maschinen, was zu erhöhten Stillstandzeiten führt. Die prozentuale Steigerung der Reduktion des Energiebedarfs der untersuchten Stand-by-Strategien resultiert aus einem Anstieg der für einen Stand-by-Betrieb nutzbaren Pausenlänge. Bedingt durch die geringe Anzahl an Bauteilen erfolgt ein schnelleres Leerfahren der Produktionslinie. Die entstehenden Maschinenstillstände sind durchschnittlich länger und können besser für einen Stand-by-Betrieb genutzt werden.

6.2.3 Szenario S3: Maschinenverfügbarkeiten

Je nach Maschinenalter, Maschinentyp, Hersteller und gefertigtem Produkt kann eine Maschine unterschiedliche Maschinenverfügbarkeiten aufweisen. Zusätzlich können die Fehlerhäufigkeit und die zeitlichen Intervalle zwischen den Fehlern sowie auch die Dauer zur

Wiederinbetriebnahme schwanken. In diesem Szenario erfolgt deshalb die Untersuchung der beschriebenen Einflussfaktoren. Ausgehend vom Basisszenario B0 erfolgt eine Variation der Maschinenverfügbarkeit im Bereich zwischen 90 % und 100 % bei einer durchschnittlichen Instandsetzungszeit von 15 Minuten.

Daran anschließend erfolgt die Untersuchung der Auswirkung verschiedener Instandsetzungszeiten bei einer gleichbleibenden Maschinenverfügbarkeit von 97 %.

6.2.3.1 Ergebnisdarstellung: Szenario S3

Die spezifischen Energiebedarfe für die Herstellung eines Bauteils bei unterschiedlichen Maschinenverfügbarkeiten sind in Abbildung 6.13 dargestellt. Die durchschnittliche Instandsetzungszeit beträgt 15 Minuten und wird nicht variiert.

Es ist ersichtlich, dass mit sinkender Maschinenverfügbarkeit der spezifische Energiebedarf je Bauteil steigt. Dies resultiert aus den steigenden Maschinenstillstandzeiten der vor- und nachgelagerten Prozesse im Falle einer Störung. Bezogen auf den Energiebedarf bei einer Maschinenverfügbarkeit von 100 %, steigt der spezifische Energiebedarf linear und liegt mit einer 90%igen Maschinenverfügbarkeit um 17 % höher als anfänglich. Auch bleibt der qualitative Verlauf erhalten. Ein ähnliches Verhalten konnte in Szenario S1 beim Eintreten langer Unterbrechungen ermittelt werden. Weiter ist erkennbar, dass die Maschinenverfügbarkeit, bezogen auf den Gesamtenergiebedarf *ohne Stand-by*, nur einen sehr geringen Einfluss auf die prozentuale Einsparung der unterschiedlichen Abschaltstrategien hat.

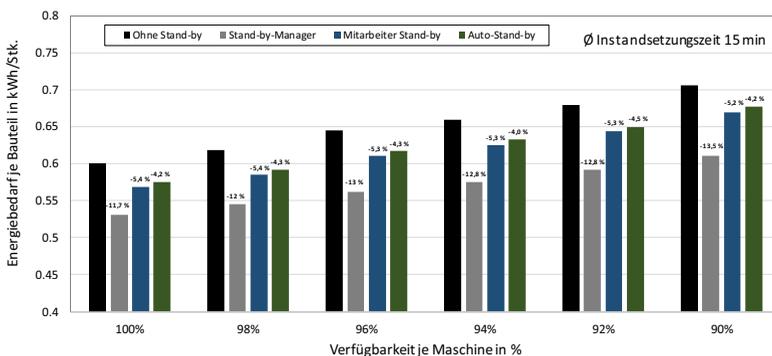


Abbildung 6.13: Energiebedarf je Bauteil bei unterschiedlichen Maschinenverfügbarkeiten

Ausgehend vom Energiebedarf ohne einen Stand-by-Betrieb erfolgt durch den Einsatz des *Stand-by-Managers* eine durchschnittliche Reduktion um ca. 12,6 %. Durch einen *Mitarbeiter Stand-by* können ca. 5,3 % eingespart werden und der *automatische Stand-by-Betrieb* ermöglicht eine Reduktion um 4,2 %.

Die Ergebnisse für die Variation der Instandsetzungsdauer bei gleichbleibender Maschinenverfügbarkeit zeigt Abbildung 6.14. Die Maschinenverfügbarkeit jeder Einzelmaschine beträgt 97 % und die durchschnittliche Instandsetzungsdauer wird beginnend mit 15 Minuten schrittweise auf 60 Minuten erhöht.

Im Unterschied zu der Variation der Maschinenverfügbarkeiten hat die Länge der Instandsetzungsdauer nur einen geringen Einfluss auf die spezifischen Energiebedarfe. Dies ist begründet durch die in Summe gleichbleibende zeitliche Störungsdauer, bedingt durch konstante Maschinenverfügbarkeiten. Mit einer steigenden Instandsetzungsdauer erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass sich diese auf den vor- und nachgelagerten Materialfluss auswirkt. Die zeitlichen Anteile der für einen Stand-by-Betrieb nutzbaren Pausen steigen daraufhin. Dieser Effekt gilt für alle Abschaltstrategien. Die Steigerungsraten der Energiebedarfssenkung können Abbildung 6.14 entnommen werden.

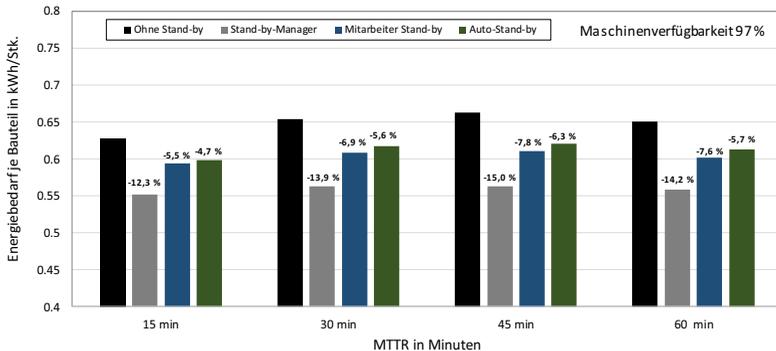


Abbildung 6.14: Energiebedarf je Bauteil bei unterschiedlichen Instandsetzungszeiten

Ergebnisinterpretation

Die Auswertung zeigt, dass die Maschinenverfügbarkeit nur einen geringen Einfluss auf die prozentuale Absenkung des Gesamtenergiebedarfs hat. Durch die Verringerung der Maschinenverfügbarkeit steigt die Anzahl an Maschinenstillständen. Dies führt zu einem erhöhten Anteil der Betriebsbereitschaft, worauf ein Anstieg des Gesamtenergiebedarfs folgt. Der nutzbare

Anteil der Unterbrechungen für die entwickelten Stand-by-Strategien steigt in einem annähernd gleichen Verhältnis wie der Gesamtenergiebedarf, sodass die Zunahme an Pausen bezogen auf den Gesamtenergiebedarf nur eine geringfügig erhöhte Ausschöpfung des bestehenden Potenzials hervorruft.

Durch die Verlängerung der Instandsetzungszeiten erhöht sich der Anteil an längeren Pausen. Diese können durch die bestehenden Abschaltstrategien besser genutzt werden. Das Potenzial der unterschiedlichen Abschaltstrategien verändert sich vergleichsweise wie im Basisszenario B1 bei langen Unterbrechungen.

Kapitel 7

Experimentelle Untersuchungen

Fertigungssteuerungssysteme beeinflussen maßgeblich die Ausbringungen des gesamten Fertigungssystems. Änderungen an diesen und die Erprobung neuer Steuerungsmechanismen können die Produktivität negativ verändern. Im siebten Kapitel erfolgt deshalb mithilfe eines Laborsystems, welches einen Teilausschnitt des in Kapitel 5 vorgestellten Referenzfertigungssystems repräsentiert, eine Test- und Evaluierungsphase des entwickelten Stand-by-Managers. Anfänglich wird der mechanische und steuerungstechnische Aufbau des Laborsystems erläutert. Darauf aufbauend erfolgt die Integration des Stand-by-Managers in das Laborsystem mit anschließender Erprobungsphase. Abschließend werden in Versuchen unterschiedliche Szenarien des Stand-by-Managers erprobt und die Ergebnisse dargestellt.

7.1 Aufbau des Laborsystems

Der Versuchsaufbau stellt das Transfersystem eines realen Fertigungssystems im verkleinerten Maßstab dar. Das Transfersystem ist in der Lage, unterschiedliche Materialflussstrategien abzubilden und verschiedene Arbeitsfolgen anzufahren. In Abbildung 7.1 ist die aktuelle Versuchsanlage dargestellt, eine technische Einteilung der Bereiche zeigt Abbildung 7.2.



Abbildung 7.1: Foto der Verkettungsanlage bzw. des Laborsystems

Der Untersuchungsschwerpunkt besteht in der Abbildung realer Transportmechanismen eines gesamten Fertigungssystems. Dazu ist das Verkettungssystem um Maschinenmodelle erweitert worden. Die Maschinenmodelle repräsentieren die einzelnen Bearbeitungsschritte des Fertigungssystems und simulieren im Transportprozess die Bearbeitungszeit, auftretende Rüstvorgänge und Störungen der Maschinen. Das Verkettungssystem ermöglicht alle marktüblichen Mechanismen für eine intelligente und flexible Materialflusssteuerung und basiert hardwareseitig auf Standardkomponenten des industriellen Umfelds. Zusätzlich erfolgt der Aufbau einer IT-Infrastruktur, welche alle Teilsysteme miteinander vernetzt und die Integration des Stand-by-Managers ermöglicht.

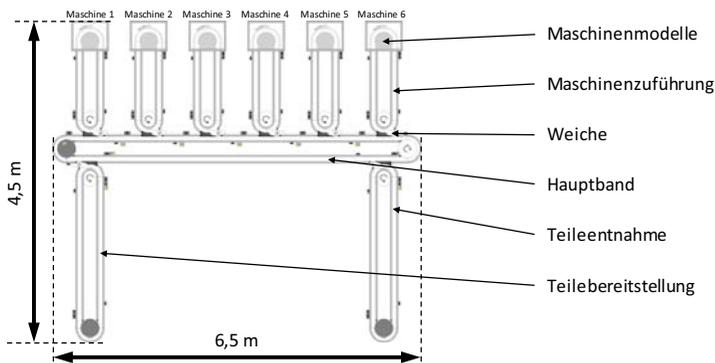


Abbildung 7.2: Schematischer Aufbau des Laborsystems

Mechanischer Aufbau

Das Transfersystem besteht aus neun Kettenfördersystemen (Bosch Rexroth VarioFlowPlus®), welche jeweils über einen frequenzgeregelten Kurvenradantrieb angetrieben werden. Der Transport der Bauteile auf der Förderstrecke erfolgt mithilfe von Werkstückträgern. Diese können mithilfe von Stoppern auf den Transportbändern gestoppt und vereinzelt werden. Die einzelnen

Förderbänder sind über pneumatisch betätigte Weichen miteinander verbunden und können in ihrer Funktion unterschieden werden. In der Teilebereitstellung werden die Warenträger mit Bauteilen bestückt. Zudem können leere Werkstückträger aufgestaut und gepuffert werden. Das Hauptband übernimmt die Verteilung der unbearbeiteten Bauteile zu den Maschinen und den Rücktransport bearbeiteter Bauteile in die Teileentnahme. Zusätzlich kann das Hauptband als Teilepuffer dienen. Die Maschinenzuführungen transportieren die Bauteile zu den einzelnen Maschinen, dabei können die Bauteile sowohl vor als auch nach der Maschine gestaut und gepuffert werden. In den Maschinenmodellen erfolgt die simulative Bearbeitung des Bauteils. Dazu werden alle bearbeitungsspezifischen Zeiten abgebildet und das Bauteil für diesen Zeitraum im Maschinenmodell gestoppt.

Steuerungs-, Sensor- und Aktortechnik

Zur Steuerung des Transfersystems sind eine Reihe unterschiedlicher Sensoren und Aktoren notwendig. Abbildung 7.3 zeigt den grundlegenden Aufbau der Kommunikationsstruktur zwischen der Steuerung und den verwendeten Sensoren und Aktoren.

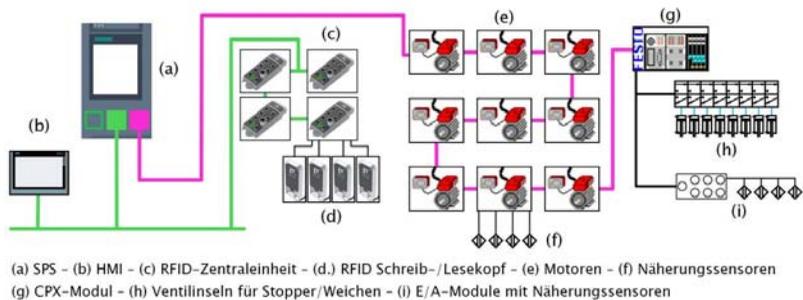


Abbildung 7.3: Sensorplan des Laborsystems

Die Automatisierung der Anlage erfolgt über eine speicherprogrammierbare Steuerung der Firma Siemens vom Typ S7-1516-3PN/DP. Diese kommuniziert über die Bussysteme PROFINET® und PROFIBUS® mit den einzelnen Aktoren und Sensoren. Zusätzlich können digitale und analoge Signale verarbeitet werden. Das Kernstück der Materialflusssteuerung bildet ein RFID-System. Dieses besteht aus 16 Schreib-/Leseköpfen, welche über vier Zentraleinheiten Daten an die SPS liefern. Jeder Werkstückträger ist mit einem Transponder ausgestattet, welcher bis zu 2 kByte an Informationen speichern kann. Die Steuerung der Weichen und Stopper erfolgt über eine dezentral modular aufgebaute Steuereinheit. Diese beinhaltet die Baugruppen der elektrischen

Ventilinseln sowie die Anbindung einer zusätzlichen digitalen E/A-Einheit über den Kommunikationsstandard IO-Link. Die verbauten Antriebsmotoren treiben über ein Schneckenradgetriebe die Förderketten an. Die Drehzahl ist stufenlos zwischen 290 1/min und 2900 1/min einstellbar. Der Frequenzumrichter bietet zudem die Möglichkeit, zusätzliche digitale Signale über das Bussystem direkt an die SPS zu übertragen. Die Steuerung der Anlage erfolgt über eine Mensch-Maschinen-Schnittstelle (HMI). Über diese werden alle wichtigen Prozessparameter vorgegeben und visualisiert. Tabelle 7.1 zeigt eine Übersicht der wichtigsten technischen Daten des Laborsystems, unterteilt in die einzelnen Bereiche.

Tabelle 7.1: Technische Daten des Laborsystems

	Hauptband	Hauptband	Maschinenzuführung	Teilebereitstellung	Teileentnahme
Gesamtlänge der Förderstrecke	14 m		4 m	7 m	7 m
Geschwindigkeit der Förderstrecke	1-18 m/min		1-18 m/min	1-18 m/min	1-18 m/min
Bauteile zeitgleich im Bereich	20 Stk.		10 Stk.	20 Stk.	20 Stk.
Art des Förderbandes	Kettenfördersystem				
Anzahl der Vereinzeler	8 Stk.		3 Stk.	2 Stk.	2 Stk.
Anzahl RFID-Schreib-/Lesekopf	8 Stk.		1 Stk.	1 Stk.	1 Stk.
Anzahl Näherungssensoren	8 Stk.		5 Stk.	4 Stk.	4 Stk.

Maschinenmodelle

Die Maschinenmodelle simulieren als Blackbox den Funktionsumfang einer Werkzeugmaschine hinsichtlich der für den Material- und Energiefluss relevanten Parameter. Jedes Maschinenmodell besteht hardwareseitig aus einem Hüllmodell, welches mit einer Schreib-/Leseeinheit des RFID-Systems sowie zwei Bauteilvereinzelnern ausgestattet ist. Die Maschinenmodelle werden jeweils einzeln über eine eigenständige Software gesteuert und sind von den Steuerungsmechanismen des Transfersystems entkoppelt. Der Funktionsumfang der Maschinenmodelle umfasst folgende Funktionen:

- Die Simulation der Bearbeitungs- bzw. Taktzeit der Maschine
- Die Simulation von Stör- und Rüstzeiten
- Die Simulation verschiedener Stand-by-Strategien auf Maschinenebene
- Die Abbildung der Energie- und Medienbedarfe der Maschine in Abhängigkeit des Maschinenzustands
- Die Visualisierung der Energiebedarfe und Maschinenzustände

Vereinfachungen Laborsystem

Das Laborsystem weicht in einigen technischen Ausführungen von dem untersuchten Referenzfertigungssystem ab. Aufgrund von räumlichen Beschränkungen ist es nicht möglich alle geometrischen Abmessungen maßstabsgetreu nachzubilden.

Dennoch entsprechen die Abmessungen der Versuchsanlage in den wesentlichen Punkten einem Maßstab von 1/5. Einschränkungen bestehen in Bezug auf die vorhandenen Pufferstrecken vor den Maschinenmodellen sowie auch auf die Anzahl möglicher Werkstückträger auf den Transferstrecken. Für einen Materialfluss ohne künstliche Staueffekte bei verschiedenen Taktzeitabstimmungen und Transportgeschwindigkeiten ist mithilfe einer empirischen Untersuchung die maximale Anzahl gleichzeitig sich im Laborsystem befindender Werkstückträger auf 40 bestimmt worden.

Zudem wurde die Sensorik auf die für die Steuerung des Materialflusses notwendigen Komponenten reduziert. Auf spezielle Sicherheitsabfragen, Redundanzen der Sensortechnik oder die Schaffung von Einrichtungen für einen manipulationssicheren Prozess wurde verzichtet. Auch erfolgt derzeit keine Be- und Entladung der Anlage mit realen Bauteilen. Die Bauteile werden derzeit rein virtuell mitgeführt.

7.1.1 Basisautomation

Um den gleichzeitigen Zugriff aller Programmbausteine auf die Automatisierungsdaten zu gewährleisten, erfolgt der grundlegende Softwareaufbau nach einer Repository-Architektur. Alle Programme und Teilprogramme greifen auf einen zentral angelegten Speicherbaustein zurück, über welchen auch der Datenaustausch der Teilprogramme realisiert wird. Abbildung 7.4 zeigt die Teilprogramme des Automatisierungskonzepts, welche zentral über einen Datenbaustein gekoppelt sind.

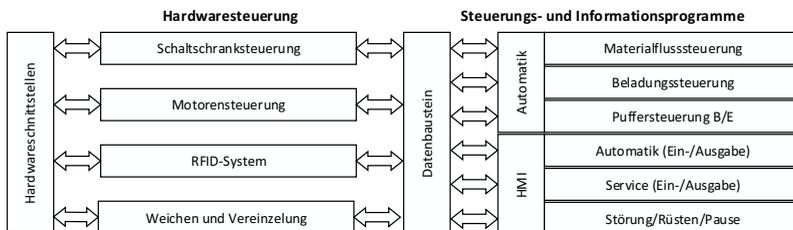


Abbildung 7.4: Automatisierungskonzept des Laborsystems (Peter 2016; vgl. Peter 2016, S. 39)

Die Hardwaresteuerung ist in vier Teilprogramme unterteilt, welche über Hardwareschnittstellen die anfallenden Sensordaten vorverarbeiten und die Kommunikation mit dem Datenbankbaustein auf die wesentlichen Ein- und Ausgabedaten zur Ansteuerung der Aktoren begrenzen. Zudem sind in der Hardwaresteuerung alle Sicherheitsmechanismen und Startstrategien implementiert. Die Schaltschranksteuerung beinhaltet die Initialisierungsphase des Systems, welche im Falle eines Neustarts oder Notausfalls aktiv wird. Die Überwachung und Signalverarbeitung der frequenzgeregelten Motoren übernimmt die Motorensteuerung. Lediglich die Soll Drehzahl und eine Startfreigabe werden über den Datenbankbaustein ausgetauscht. Das Teilprogramm RFID-System übernimmt die gesamte Steuerung der Schreib- und Lesebefehle. Über den Datenbankbaustein werden ausschließlich die bauteil- und materialflussspezifischen Informationen übertragen. Die Bauteilvereinzelung und Materialflussweichen werden in ihren Positionen und zeitlichen Abhängigkeiten über das Teilprogramm Weichen und Vereinzelung gesteuert. Über den Datenbankbaustein erfolgen die Angaben der aktuellen Weichen- und Stopperpositionen sowie die Vorgabe der Ansteuerungslogik. In den Steuerungs- und Informationsprogrammen erfolgt die gesamte Logikberechnung. Über ein HMI kann zwischen den unterschiedlichen Programmen gewählt werden. Im Service- und Handbetrieb können alle Aktoren und Sensoren separat angesprochen und aufgerufen werden. Der Servicebetrieb unterstützt bei der Inbetriebnahme und dient der Durchführung von Versuchsprogrammen, welche der Automatikmodus nicht vorsieht. Der Automatikbetrieb kann als Hauptprogramm angesehen werden, in welchem die gesamte Logik der Materialflusststeuerung des Fördersystems hinterlegt ist.

Dabei wird in drei Unterprogramme unterschieden. Die Materialflusststeuerung übernimmt die Verteilung der Werkstückträger zu den Prozessen. Die Entscheidungslogik, welcher Prozess angefahren wird, ist bestimmt durch die bauteilspezifischen Informationen auf dem RFID-Transponder. Abbildung 7.5 zeigt die zugehörige Datenstruktur eines RFID-Transponders.

Byte	Beschreibung	Wert
1.	Werkstückträgernummer	43
2.-3.	Seriennummer	3599
4.	Bauteiltyp	A (1)
5.	Bearbeitungsstatus	0001 1000
6.	Arbeitsfolge Step 1	5
7.	Arbeitsfolge Step 2	4
8.	Arbeitsfolge Step 3	1
9.	Arbeitsfolge Step 4	6
10.	Arbeitsfolge Step 5	-
11.	Arbeitsfolge Step 6	-
12.	Nächste Station	1

Abbildung 7.5: Datenstruktur des RFID-Transponder zur Materialflusssteuerung (in Anlehnung an Peter 2016, S. 52)

Jeder Warenträger besitzt eine einmalige festvergebene Werkstückträgernummer. Zusätzlich wird die Seriennummer des sich auf dem Werkstückträger befindenden Bauteils gespeichert sowie der Bauteiltyp mitgeführt. Anhand des Bauteiltyps kann die Arbeitsfolge bestimmt werden, welche sich ebenfalls mit den einzelnen Bearbeitungsschritten auf dem Transponder befindet. Der Bearbeitungsstatus stellt eine Historie dar, anhand derer die aktuell durchlaufenen Prozessschritte rückverfolgt werden können. Welcher Prozess als nächstes angefahren wird, ist über die Information der nächsten Station definiert. Anhand einer in Abbildung 7.6 exemplarisch dargestellten Verzweigung im Materialflusssystem erfolgt die Beschreibung der grundlegenden Materialflusssteuerung.

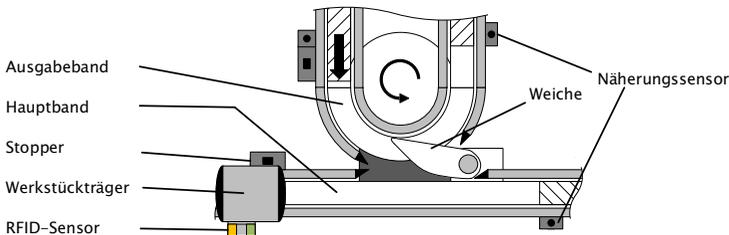


Abbildung 7.6: Bauteilsteuerung in den Weichenbereichen

Trifft ein Bauteil auf eine Verzweigung, wird der Werkstückträger gestoppt und die RFID-Transponderdaten gelesen. Anhand des Bearbeitungsstatus wird ermittelt, welche Prozesse das Bauteil durchlaufen hat. In der beispielhaften Darstellung aus Abbildung 7.5 ist anhand der Bitfolge ersichtlich, dass das Bauteil die ersten beiden Schritte der Arbeitsfolge durchlaufen hat. Das Bit 4 und Bit 5 (Zählweise beginnend mit 1 von links) des Bearbeitungsstatus zeigen eine 1. Mithilfe der Aufschlüsselung ist festzustellen, dass der Step 1 mit der Maschine 5 und der Step 2 mit der Maschine 4 der Arbeitsfolge durchlaufen wurde. Der nächste Schritt in der Arbeitsfolge ist

Step 3, welcher zur Maschine 1 führt. Stimmen die Schritte der Arbeitsfolge mit der Maschinenbezeichnung überein, fährt der Werkstückträger in die Maschine. Ist der Werkstückträger nicht für die Maschine bestimmt, erfolgt nach dem FIFO-Prinzip eine Weiterleitung zum nächsten Prozess. Dort wird die beschriebene Abfrage wiederholt.

Das Unterprogramm Beladungssteuerung versorgt die Anlage mit Bauteilen. Die Beladungssteuerung kann manuell durch einen Mitarbeiter erfolgen, welcher definiert, wie viele Bauteile von welchem Bauteiltyp nacheinander ausfahren. Zusätzlich ist eine automatische Beladung möglich, bei der in einem festen Zeitintervall ein definierter Bauteiltyp ununterbrochen ausgefahren wird. Auch das Beladen der Anlage mit unterschiedlichen Bauteilen bei variierenden Zeiten ist möglich. Dazu erfolgt die zeitliche Vorgabe des Beladungszeitpunkts mit zugehörigem Bauteiltyp in Form einer Lieferliste.

7.1.2 Vernetzung der Teilsysteme

Alle Teilsysteme sind miteinander vernetzt und ermöglichen einen bidirektionalen Datenaustausch durch alle Ebenen der Automatisierungspyramide. Die prinzipielle Struktur ist in Abbildung 7.7 dargestellt.

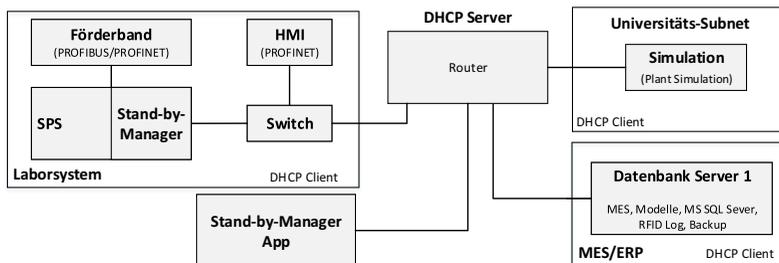


Abbildung 7.7: Vernetzung der Teilsysteme des Versuchsumfelds

Im Aufbau kann vereinfacht zwischen einer direkten und einer indirekten Kopplung der einzelnen Teilsysteme unterschieden werden. Bei der indirekten Kopplung erfolgt aufgrund verschiedener Übertragungsprotokolle der Teilsysteme der Datenaustausch über eine auf einem Datenbankserver eingerichteten Datenbank. Je nach Laufzeitumgebung der entwickelten Applikationen zum Datenaustausch können jedoch die Lese- und Schreibzyklen in ihrer zeitlichen Dauer variieren. Bei der direkten Kopplung ist keine Datenbank erforderlich. Die einzelnen Programme tauschen Daten über ein definiertes Protokoll direkt ohne Zwischenspeicher aus. Das Laborsystem kommuniziert intern über die Protokolle PROFIBUS/PROFINET und IO-Link. Der

externe Datenaustausch erfolgt über die Protokolle TCP/IP RFC1006-Protokoll und OPC-UA. Der Datenaustausch der Simulationsprogramme erfolgt über eine ODBC-Schnittstelle, welche an eine SQL-Datenbank angekoppelt ist. Der Stand-by-Manager ist in der Lage, als OPC-Server Daten direkt mit dem Laborsystem auszutauschen. Zudem erfolgt ein indirekter Datenaustausch über eine Datenbank, in welcher Informationen mit den Simulationsmodellen sowie auch den Informations- und Betriebsdatenerfassungssystemen der MES-Ebene ausgetauscht werden.

7.2 Implementierung und Systemtest des Stand-by-Managers

Ziel der Implementierungsphase ist die Erprobung und Überprüfung der in Kapitel 4 entwickelten Funktionalitäten des Stand-by-Managers an realer Anlagentechnik. Die Implementierung des Stand-by-Managers erfolgt auf den in Kapitel 4.3 beschriebenen Umsetzungsplattformen der speicherprogrammierbaren Steuerung sowie der in VB.NET umgesetzten Hochsprachenapplikation. Im Folgenden beschränkt sich die Darstellung der Ergebnisse auf die Entwicklung der Hochsprachenapplikation. Die entwickelte Software wird in ihrer Gesamtheit auf mögliche Fehler überprüft. Des Weiteren erfolgt eine Beurteilung der Berechnungsgenauigkeit der Ankunftszeitberechnung.

7.2.1 Konfiguration Stand-by-Manager

Der Stand-by-Manager kann in beliebig aufgebauten Fertigungssystemen eingesetzt werden. Für die Implementierung und Inbetriebnahme in das Laborsystem erfolgt eine systemspezifische Konfiguration der dem Skalierungsmodell aus Kapitel 4.5.1 zu Grunde liegenden Zusammenhänge. Die für das Laborsystem erforderlichen Konfigurationsdaten sind in vier Bereiche unterteilt, welche in einer Eingabemaske des Stand-by-Managers in Abbildung 7.8 dargestellt sind.

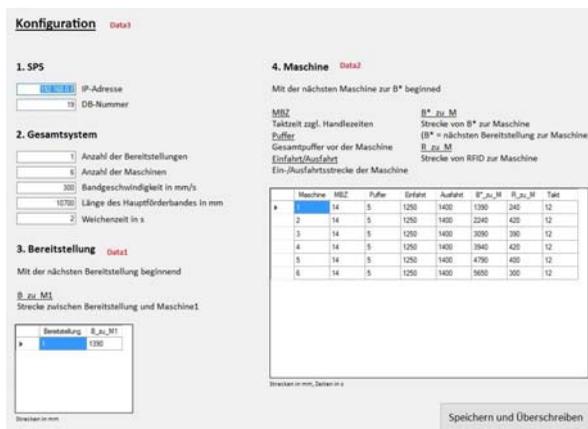


Abbildung 7.8: Konfigurationsmaske des Stand-by-Managers (vgl. Lau 2016, S. 63)

Im Bereich 1. SPS erfolgt die Parametrierung der SPS-Schnittstelle. Diese beschränkt sich auf die Vorgabe der IP-Adresse und der Datenbanknummer, aus welcher die Steuerungsdaten des Laborsystems gelesen werden. Das Gesamtsystem wird durch die Anzahl der enthaltenen Maschinen und Teilebereitstellungen beschrieben. Zudem werden die initiale Bandgeschwindigkeit, die durchschnittliche Handlingsdauer in den Weichenbereichen, sowie auch die Gesamtlänge des Hauptbandes definiert. Der dritte und vierte Bereich konfiguriert die relativen Entfernungen und Strecken der Teilebereitstellungen und Maschinen, die Anzahl möglicher Pufferplätze vor den Maschinen und die Bearbeitungszeiten bzw. Taktzeiten der Maschinen.

Die dem Konfigurationsprozess zugewiesenen Daten werden in einer Konfigurationsdatei gespeichert, welche in den Berechnungsprozess integriert ist. Das Ändern geometrischer Abmessungen oder der Anzahl der Anlage ist nachträglich nur durch das Erstellen einer neuen Konfigurationsdatei möglich. Die Bandgeschwindigkeit, die Weichenzeit, die Bearbeitungszeit und die Taktzeiten sind variabel deklariert und können beispielsweise direkt der Maschinensteuerung entnommen werden.

7.2.2 Integrationstest Stand-by-Manager

Dem Systemtest vorgelagert erfolgt ein Integrationstest. Der Untersuchungsfokus bei diesem liegt auf den Schnittstellenfunktionalitäten der einzelnen miteinander kommunizierenden Teilsysteme.

Eine konsistente Verarbeitung der zyklisch entstehenden Daten kann nur erreicht werden, wenn die miteinander kommunizierenden Teilsysteme, z.B. über einen Handshake, die Lese- und Schreibrechte abstimmen oder sichergestellt ist, dass erforderliche Lese- und Schreibzyklen zeitliche Mindestanforderungen erfüllen.

Im Integrationstest erfolgt deshalb die Überprüfung der Zykluszeiten der einzelnen miteinander kommunizierenden Teilsysteme. Die erforderlichen Zykluszeiten sind durch das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem bestimmt, welches besagt, dass mindestens das doppelte der höchsten Änderungsfrequenz zur vollständigen Abbildung eines Signals benötigt wird.

Die maximale Zustandsänderung eines für die Berechnung erforderlichen Sensors ist bestimmt durch das Zeitintervall, welches benötigt wird, um den Sensor erneut aufzurufen. Dies ist in den untersuchten Fertigungssystemen abhängig von der Transportgeschwindigkeit des Transfersystems und der Werkstückträgerlänge. Typische Aufruffrequenzen und Signalzustände der Sensortechnik liegen zwischen 500 ms und 1000 ms. Die Mindestanforderung an die Programmzyklen liegen somit bei ≤ 250 ms.

Mit einer auslastungsunabhängigen Zykluszeit von ca. 30 ms erfüllt die SPS des Laborsystems die Mindestanforderung an die minimale Zykluszeit. Die vom Stand-by-Manager durchzuführenden Berechnungen sind hingegen abhängig von der sich im System befindenden Bauteilanzahl. Deshalb variiert die Zykluszeit auslastungsabhängig zwischen 50 ms und 250 ms. Die Mindestanforderungen werden von beiden Systemen erfüllt, wobei sich die Zykluszeit des Stand-by-Managers im Grenzbereich des Zulässigen befindet.

Für die Implementierung des Stand-by-Managers erfolgt die Erweiterung des Systems aufgrund der Zykluszeitproblematik um einen echtzeitfähigen Datenspeicher auf Steuerungsebene, welcher die anfallenden Sensordaten temporär bis zu deren Verarbeitung durch den Stand-by-Manager zwischenspeichert.

7.2.3 Systemtest Stand-by-Manager

Nach dem Integrationstest folgt der Systemtest. Das Laborsystem dient als Testumgebung, in welcher die gesamten funktionellen Anforderungen des Stand-by-Managers überprüft werden. Der Systemtest beinhaltet die Überprüfung der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Funktionsgruppen. Die Funktionsprüfung des Anfahr- und Manipulationsmanagements erfolgt im Rahmen der Testphase durch Begutachtung und strukturierte Prüfung des definierten Reaktionsverhaltens des Stand-by-Managers. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine detaillierte Darstellung des Versuchsprogramms, der Ankunftszeitprognose sowie des Störzeitmanagements.

Systemtest 1: getakteter Materialfluss, ohne Korrektur

Der Systemtest 1 erfolgt an einem synchron getakteten Materialfluss. Die Systemparameter sind so gewählt, dass ein optimaler Teiletransport zu jeder im Laborsystem enthaltenen Maschine erfolgen kann. Die Ankunftszeitberechnung entspricht dem Spezialfall der in Abbildung 4.3 beschriebenen Grundfunktion des Stand-by-Managers. Da keine transportbedingten Unterbrechungen im Materialfluss auftreten, berechnet sich die Ankunftszeit ausschließlich aus den benötigten Transport- und Bearbeitungszeiten. Dieser Sonderfall ermöglicht, die Ankunftszeiten eines Bauteils für alle vorhandenen Maschinen einmalig, ohne eine Korrektur und zu Beginn des Produktionsstarts zu berechnen.

Ziel des Tests ist die Überprüfung der Berechnungsgrundlage der Ankunftszeitermittlung. Geprüft werden die zeitlichen Übereinstimmungen der am Anfang einmalig berechneten Ankunftszeiten mit den realen Ankunftszeiten der Werkstückträger an den Maschinen. Für den Versuch erfolgt keine zyklische Aktualisierung der Zeitprognose. Fehler in der Berechnungsstruktur können so erkannt werden. Für den in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Sonderfall können zwei Hypothesen formuliert werden, welche der Versuch belegen soll:

- Die zeitliche Dauer des Transports ist für alle Bauteile mit demselben Ziel identisch
- Die Berechnung der Ankunftszeit für beliebige Ziele am Anfang des Transportprozesses entspricht der realen Transportdauer

Der Versuch erfolgt mit einer Geschwindigkeit des Transfersystems von 300 mm/s. Die Taktzeit der Maschinen, der Teilebereitstellung und der Teileentnahme beträgt 14 Sekunden. Die Bauteile durchlaufen eine feste Arbeitsfolge, wobei die Maschinen 1 bis 6 der Reihe nach angefahren werden.

Die Auswertung der Ergebnisse für 600 Zeitreihen zeigt Abbildung 7.9.

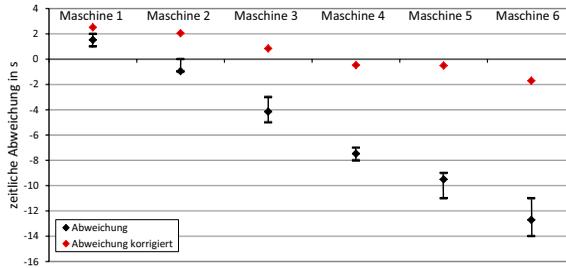


Abbildung 7.9: Ergebnisse Systemtest 1 (getakteter Materialfluss)

Aufgetragen sind der Mittelwert und die minimalen und maximalen zeitlichen Abweichungen zwischen berechneter und realer Ankunftszeit der Werkstückträger an den einzelnen Maschinen. Die Versuchsreihe konnte nachweisen, dass die Transportdauer aller Werkstückträger mit gleichem Ziel eng beieinanderliegt und es zu keinen signifikanten Abweichungen kommt.

Zudem ist zu erkennen, dass die berechneten Ankunftszeiten nicht exakt mit den realen Ankunftszeiten übereinstimmen. Die Maschine 1 wird durchschnittlich ca. 1,5 Sekunden zu früh erreicht. Alle weiteren Maschinen werden zu spät erreicht. Der durchschnittliche Fehler erhöht sich je Bearbeitungsschritt um ca. zwei Sekunden. Zwischen den einzelnen Maschinen nimmt die Abweichung der berechneten und der realen Ankunftszeit linear zu. Eine Fehleranalyse zu der Ursache zeigt, dass es aufgrund der erforderlichen Beschleunigungsvorgänge in den Weichenbereichen und den Maschinenmodellen nach einem Stoppvorgang zu einer Verlängerung der Transportzeit kommt. Es handelt sich um eine systematische Abweichung, welche sich über die Arbeitsfolge fortpflanzt.

Auf eine Korrektur des entstehenden Fehlers wird in der Berechnung der Ankunftszeiten verzichtet. Durch die ereignisgesteuerte Aktualisierung der prognostizierten Ankunftszeiten im realen Betrieb wird der Berechnungsfehler minimiert und eine Fehlerfortpflanzung ausgeschlossen.

Die exemplarische Fehlerkorrektur in Abhängigkeit der Stopp- und Beschleunigungsvorgänge ist ebenfalls in Abbildung 7.9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die berechnete Ankunftszeit annähernd mit der realen Ankunftszeit übereinstimmt. Die vorhandenen Abweichungen sind auf eine Geschwindigkeitsreduktion der Bauteile durch Reibungsvorgänge in den Kurven und Ungenauigkeiten bei der Streckenermittlung zurückzuführen.

Der Systemtest konnte nachweisen, dass für einen getakteten Materialfluss die reale Ankunftszeit für Bauteile mit demselben Ziel identisch ist. Auch konnte gezeigt werden, dass die berechneten Ankunftszeiten mit den realen Ankunftszeiten übereinstimmen.

Systemtest 2: getakteter Materialfluss, mit Berechnungskorrektur

Der Systemtest 2 ist identisch parametrisiert wie der Systemtest 1. Der Unterschied besteht in der Berechnungssystematik des Stand-by-Managers. Im Gegensatz zum Systemtest 1 erfolgt eine Aktualisierung und ggf. eine Korrektur der Ankunftszeitberechnung, sobald der Werkstückträger seine Position ändert und von einem Sensor erkannt wird. Die Korrektur ist erforderlich, um die sich ständig verändernden Bedingungen im Materialfluss zu berücksichtigen.

Ziel des Tests ist die Überprüfung der Ankunftszeitberechnung mit ereignisbedingter Berechnungskorrektur. Untersucht wird die zeitliche Abweichung zwischen den berechneten Ankunftszeiten und den realen Ankunftszeiten. Es gilt folgende Hypothese zu belegen:

- Auftretende Abweichungen bei der Ankunftszeitberechnung sind unabhängig von der Position des Ziels im Materialflusssystem

Das Ergebnis der Auswertung für 600 Zeitreihen ist in Abbildung 7.10 dargestellt.

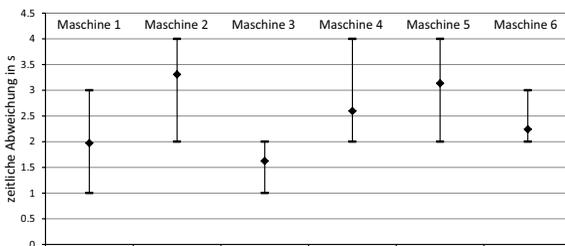


Abbildung 7.10: Ergebnisse Systemtest 2: (getakteter Materialfluss mit Berechnungskorrektur)

Aufgetragen sind identisch zum Systemtest 1 der Mittelwert sowie die minimalen und maximalen zeitlichen Abweichungen zwischen berechneter und realer Ankunftszeit der Werkstückträger an den einzelnen Maschinen. Es ist erkennbar, dass die zeitlichen Abweichungen durchgehend im positiven Bereich liegen. Zudem liegen diese eng beieinander. Eine Abhängigkeit der zeitlichen Abweichungen von der Position der Maschine im Materialflusssystem kann nicht festgestellt werden.

Systemtest 3: Bauteilmix

Im Systemtest 3 werden gleichzeitig verschiedene Bauteiltypen mit unterschiedlichen Arbeitsfolgen auf dem Laborsystem bearbeitet. Ziel ist die Überprüfung der Ankunftszeitberechnung mit Berechnungskorrektur sowie die Untersuchung des Korrekturverhaltens eines ungetakteten Materialflustransports.

In einem Intervall von 30 Sekunden erfolgt das Ausschleusen dreier verschiedener Bauteiltypen (A, B, C) als Batch. Der Bauteiltyp A durchläuft Maschine 1 und Maschine 4, der Bauteiltyp B durchläuft Maschine 2 und Maschine 5 und der Bauteiltyp C durchläuft Maschine 1 und Maschine 6. Der Transport und die Bearbeitung unterschiedlicher Bauteiltypen führten auf dem Laborsystem zu einem ungleichmäßigen Materialfluss und einer ungleichmäßigen Maschinenauslastung.

Die Grundfunktion der Korrektur der Ankunftszeitberechnung ist unabhängig von der Anzahl sich im Laborsystem befindender Werkstückträger und Bauteiltypen. Die Ergebnisse des Systemtests 3 müssten demnach qualitativ den Ergebnissen des Systemtests 2 entsprechen.

Das Ergebnis der Auswertung für 600 Zeitreihen ist in Abbildung 7.11 dargestellt.

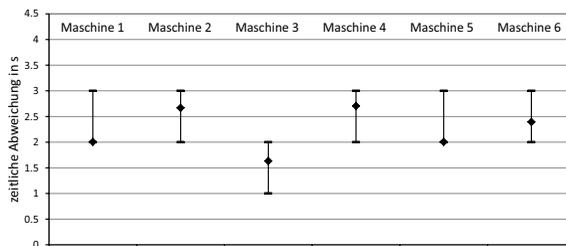


Abbildung 7.11: Ergebnisse Systemtest 3: (Bauteilmix mit Berechnungskorrektur)

Die zeitlichen Abweichungen der Ankunftszeitberechnung liegen eng beieinander. Die maximale Abweichung einzelner Werte beträgt ca. 3 Sekunden und die durchschnittliche Abweichung beträgt ca. 2 Sekunden. Im Vergleich zum Systemtest 2 ist zu erkennen, dass die Streuung zwischen der minimalen und maximalen Abweichung abnimmt. Dies ist durch eine erhöhte Aktualisierungs- bzw. Korrekturrate begründet, ausgelöst durch die gestiegene Anzahl sich im Laborsystem befindender Werkstückträger.

Die Korrektur der berechneten Ankunftszeiten unterliegt im Regelfall geringen Änderungsraten. Diese resultieren aus sich verändernden Materialflussgegebenheiten, z.B. hervorgerufen durch die Änderung der Teileanzahl in einem Puffer oder die Verzögerung des Teiletransports durch Schlupf-, Anfahr- und Reibeffekte sowie den Eingriff durch einen Mitarbeiter in das Materialflusssystem. Einen typischen Verlauf der Ankunftszeitkorrektur dieser Effekte für eine Maschine zeigt Abbildung 7.12. Dargestellt sind die berechnete Ankunftszeit und der Maschinenzustand in Abhängigkeit der Bearbeitungszeit.

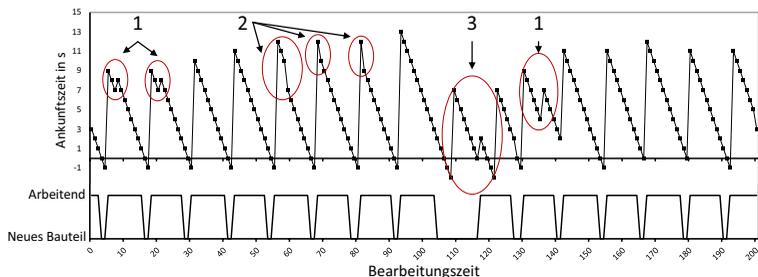


Abbildung 7.12: Ergebnisse Systemtest 3: (Darstellung der Ankunftszeitkorrektur)

In den mit 1 gekennzeichneten Bereichen erfolgt eine Korrektur der Ankunftszeit nach oben, der Werkstückträger kommt demnach später an als berechnet. Im zweiten Bereich erfolgt eine Korrektur nach unten, der Werkstückträger erreicht sein Ziel eher als geplant. Der dritte Bereich kennzeichnet ein sehr volles Hauptband, weshalb es durch Staueffekte zu einer Verschiebung zwischen realer und berechneter Ankunftszeit kommt.

Systemtest 4: Störzeitmanagement

Störungen stellen zufällig auftretende Events bei der Ankunftszeitberechnung dar und werden in der Berechnung berücksichtigt. Ziel des Systemtests 4 ist die Überprüfung der Berechnungslogik des Störzeitmanagements und die daraus entstehende Änderung der Ankunftszeit während der Betriebsphase des Laborsystems. Die Beschreibung der Versuchsdurchführung und -auswertung erfolgt exemplarisch an zwei Maschinen, bei welcher die Bauteile entsprechend der Arbeitsfolge erst die Maschine 1 und anschließend die Maschine 2 durchlaufen. Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 7.2 dargestellt.

Tabelle 7.2: Auszug der Versuchsmatrix des Störzeitmanagements

	V1	V2	V3	V4	V5
Eingabe					
Störung Maschine 1	5 min	-	5 min	5 min	10 min
Störung Maschine 2	-	5 min	5 min	10 min	5 min
Erwartungswert					
Ankunftszeit Maschine 1 +	5 min	-	5 min	5 min	10 min
Ankunftszeit Maschine 2 +	5 min	5 min	5 min	10 min	10 min

Die Versuchsdurchführung untergliedert sich in fünf Versuchsreihen, bei welchen Störungen mit verschiedener Länge in unterschiedlicher Reihenfolge den Maschinen zugewiesen werden. Der Betrieb des Laborsystems erfolgt getaktet, sodass keine Bauteile auf dem Transfersystem gepuffert werden und sich Störungen unmittelbar auf die Folgeprozesse auswirken. In der Ergebnisauswertung erfolgt der Vergleich der vom Stand-by-Manager berechneten Ankunftszeit mit dem vorher in der Versuchsmatrix definierten Erwartungswert.

In Abbildung 7.13 sind die Ergebnisse der fünf Versuchsreihen des Störzeitmanagements dargestellt. In der Versuchsreihe 1 erfährt die Maschine 1 eine fünfminütige Störung. Aufgrund der Arbeitsfolge ist die Maschine 2 unmittelbar von der Störung betroffen, da diese nachgelagert ist. Die Versuchsauswertung zeigt, dass die Störung korrekt auf die nachgelagerte Maschine übertragen wird.

In der zweiten Versuchsreihe wird die zweite Maschine für 5 Minuten gestört. Die Auswertung zeigt, dass der Erwartungswert mit dem realen Verlauf übereinstimmt. Die Störung der zweiten Maschine hat keinen Einfluss auf die Ankunftszeit der ersten Maschine.

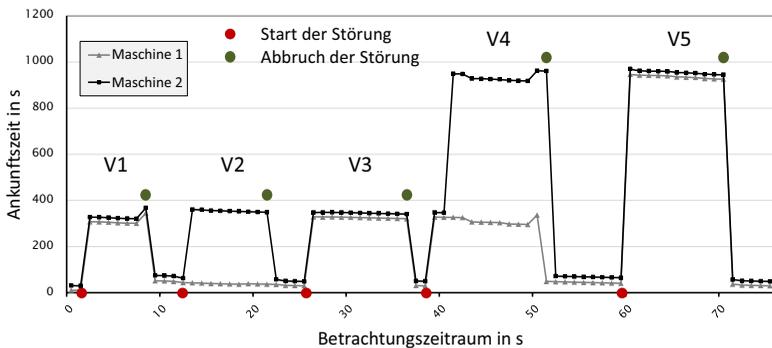


Abbildung 7.13: Ergebnisse Systemtest 4: (Störzeitmanagement)

Werden beide Maschinen zeitgleich mit derselben Störungsdauer gestört, beträgt die Gesamtdauer der Störung die Länge einer Einzelstörung. Dieses Verhalten wird in der Versuchsreihe 3 bestätigt.

In den Versuchsreihen 4 und 5 erfolgt die Untersuchung der Abhängigkeiten von vorgelagerten Störungen auf den letzten Prozess in der Arbeitsfolge. Bei der Versuchsreihe 4 erfolgt die Störung der Maschine 1 für 5 Minuten und die Störung der Maschine 2 für 10 Minuten. Der Erwartungswert besagt, dass die Störungsdauer der Maschine 2 nur von ihrer eigenen Störungsdauer abhängt. Dieses Verhalten wird durch die Versuchsreihe 4 bestätigt. In der Versuchsreihe 5 ist die Maschine 1 um 5 Minuten länger gestört als die Maschine 2. Die Störungsdauer der Maschine 2 ist somit abhängig von der Störungsdauer der Maschine 1. Auch dieser Erwartungswert wird durch die Versuchsreihe 5 belegt.

7.3 Einsatz des Stand-by-Managers am Laborsystem

Anschließend an die Integrations- und Testphase erfolgt eine Betriebsphase, in welcher neben der Quantifizierung der energetischen Einsparpotenziale durch den Einsatz des Stand-by-Managers, die Überprüfung der Ausbringungsleistung des Laborsystems stattfindet. Die Versuchsreihen sollen exemplarisch den Nachweis erbringen, dass durch den Einsatz des Stand-by-Managers der reguläre Produktionsablauf ungestört abläuft. Das Laborsystem mit den zugehörigen Maschinenmodellen repräsentiert dabei eine industrielle Fertigungslinie, in welcher der Stand-by-Manager als Produktionssteuerungssystem eingesetzt wird.

7.3.1 Versuchsparameter und Versuchsdurchführung

Die dem Laborsystem und den Maschinenmodellen zugeordneten Maschinenparameter sind in Abbildung 7.14 dargestellt. Die Arbeitsfolge 1 entspricht dem in Abbildung 5.12 abgebildeten Design der Produktionslinien 9 bis 11 der Hartfertigung. Die Grünfertigung wird exemplarisch mithilfe der Arbeitsfolge 2 dargestellt, welche die Produktionslinie 2 der Grünfertigung darstellt.

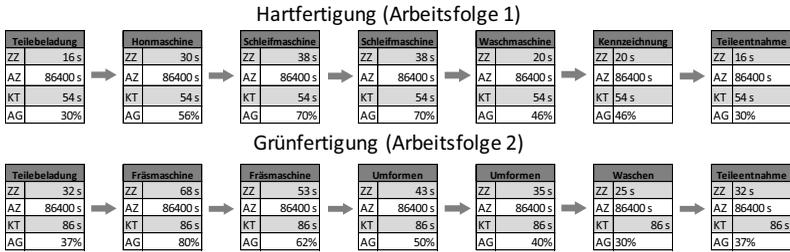


Abbildung 7.14: Arbeitsfolgen und Parameter der Betriebsphase

Die Hartfertigung ist für die Herstellung von 1600 und die Grünfertigung ist für die Herstellung von 1000 Bauteilen in 24 Stunden ausgelegt. Die Parametrisierung des Transfersystems wird mithilfe der in Kapitel 3 erhobenen Realdaten vorgenommen. Die Unterbrechungsstatistik beinhaltet eine Verteilung organisatorisch bedingter Pausen bei der Teilebereitstellung, welche aus Messdaten der Realsysteme entnommen sind. Der Auslastungsgrad der Engpassmaschine beträgt in der Hartfertigung 80 % für die Arbeitsfolge 1 und in der Grünfertigung 70 % für die Arbeitsfolge 2. Rüstvorgänge, welche den Wechsel verschlissener Werkzeuge darstellen, erfolgen in Abhängigkeit der gefertigten Bauteilzahl und dauern durchschnittlich 12 Minuten. Die einzelnen Maschinen besitzen jeweils eine Maschinenverfügbarkeit von 97 % bei einer durchschnittlichen Instandsetzungsdauer von 15 Minuten. Die Häufigkeitsverteilung und die Zeitspanne zwischen auftretenden Fehlern basieren auf einer Erlang-Verteilung und werden vorgelagert simulativ erhoben. Die den Maschinenmodellen zu Grunde liegenden Energie- und Zustandswechsellinformationen wurden in Kapitel 3.3 ermittelt. Die Durchführung untergliedert sich für jede Produktionslinie in zwei Versuche, welche jeweils drei Schichten darstellen und 24 Stunden andauern.

Versuch 1: Realbetrieb ohne Stand-by-Manager

Im ersten Versuch wird das Laborsystem wie eine Produktionslinie betrieben, die keine Stand-by-Betriebsweisen im regulären Produktionsablauf beinhaltet. Kommt es zu Unterbrechungen, verbleiben die Maschinen im Zustand *Betriebsbereit* und können, wenn wieder Bauteile für die Bearbeitung zur Verfügung stehen, unmittelbar weiter produzieren. Der Versuch dient als Ausgangsbasis für die anschließende energetische und funktionale Bewertung des Stand-by-Managers.

Ziel ist die Bestimmung der Ausbringungsleistung des Laborsystems unter Verwendung realer Produktionsdaten. Zudem erfolgt mithilfe der Maschinenmodelle die Bestimmung des erforderlichen Gesamtenergiebedarfs.

Versuch 2: Realbetrieb mit Stand-by-Manager

In der zweiten Versuchsreihe arbeitet der Stand-by-Managers als eine übergeordnete Produktionssteuerung und überführt die Maschinenmodelle anhand des berechneten Zeitsignals in einen Stand-by-Betrieb. Entsprechend der Hochlaufzeit der Maschine erfolgt vor Beendigung der Unterbrechungen das Hochfahren der Maschine, sodass diese rechtzeitig vor der nächsten anstehenden Bearbeitung den Zustand *Betriebsbereit* erreicht. Solange sich die Maschinenmodelle in einem Stand-by-Betrieb befinden, kann keine Bearbeitung von Bauteilen erfolgen. Der durch den Stand-by-Manager eingeleitete Stand-by-Betrieb wird frühzeitig unterbrochen, sobald ein Bauteil für die Bearbeitung bereitsteht. Trifft ein Bauteil vor der durch den Stand-by-Manager berechneten Zeit bei einer Maschine ein, beginnt die Hochlaufphase der Maschine und die Bearbeitung startet nach dieser. Dieser Effekt tritt nur ein, wenn der Materialfluss durch manuelle Eingriffe verändert wird oder die Ankunftszeitberechnung des Stand-by-Managers fehlerhaft ist.

Ziel ist der Nachweis, dass der Stand-by-Manager die Ausbringungsmenge des Laborsystems bei gleichzeitiger Reduktion des Energiebedarfs nicht negativ beeinflusst.

7.3.2 Versuchsergebnisse Betriebsphase

Es erfolgt die Darstellung der Versuchsergebnisse der Betriebsphase für die Hart- und Grünfertigung der beiden Versuchsreihen.

7.3.2.1 Versuch 1: Realbetrieb ohne Stand-by-Manager Hartfertigung

Eine zusammenfassende Ergebnisdarstellung zeigt Tabelle 7.3. Insgesamt wurden 1502 Bauteile bearbeitet. Für die Bearbeitung sind 1059 kWh erforderlich, was einem spezifischen Energiebedarf von 0,7 kWh je Bauteil entspricht.

Tabelle 7.3: Ergebniszusammenfassung: Realbetrieb ohne Stand-by-Manager Hartfertigung

Versuchszeit	Bauteile	E_{ges}	$E_{spez.}$			
				$E_{zustand}$	Prozentualer Anteil	Zeitlicher Anteil
24,0 h	1502	1.059 kWh	0,70 kWh/Stk.	Betriebsbereit	392 kWh 36,7%	43,8%
				Bearbeitung	631 kWh 59,7%	51,7%
				Störung	35 kWh 3,6%	4,6%

Die Maschinen besitzen ausschließlich die Betriebszustände *Betriebsbereit*, *Bearbeitung* und *Störung*. Im Zustand *Betriebsbereit* werden durchschnittlich 392 kWh benötigt. Dies entspricht 36,7 % des Gesamtenergiebedarfs, wobei der zeitliche Anteil dieses Zustands 43,8 % der Zeit andauert. Der Zustand *Bearbeitung* hat mit 59,7 % den größten Anteil am Gesamtenergiebedarf und liegt bei 631 kWh. Relativ selten treten Störungen auf. Diese verursachen ca. 3,6 % der gesamt aufzuwendenden Energie. Der Maschinenzustand *Betriebsbereit* kann für einen Stand-by-Betrieb genutzt werden. Das energetische Einsparpotenzial beträgt deshalb im idealen Fall 36,7 % des Gesamtenergiebedarfs.

Eine detaillierte Darstellung der Energiebedarfe sowie deren anteilige Verteilung für die in der Arbeitsfolge enthaltenen Maschinen zeigt Abbildung 7.15.

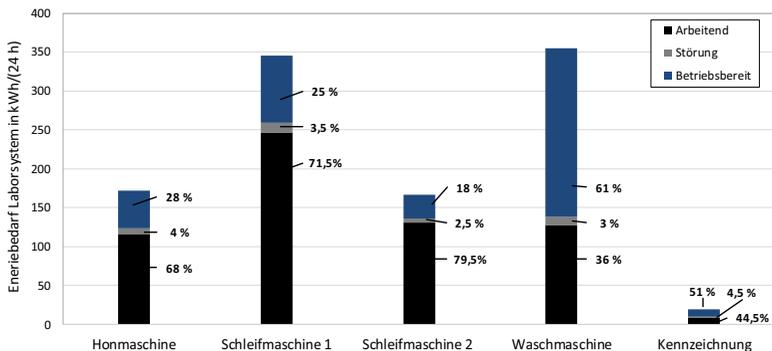


Abbildung 7.15: Energiebedarf der Hartfertigung: Versuch 1

Die Energiebedarfe im Zustand *Betriebsbereit* der Hon- und Schleifmaschinen liegen mit 18 % bis 28 % in einem durchschnittlichen Bereich. Die Waschmaschine und die Bauteilkennzeichnung zeigen mit 61 % und 51 % einen überdurchschnittlich hohen Bedarf, wobei der Gesamtenergiebedarf für das Kennzeichnen der Bauteile sehr gering ist. Die Waschmaschine besitzt das energetisch größte Einsparpotenzial aufgrund langer Bereitschaftsphasen, bedingt durch die kurze Taktzeit und einen betriebszustandsunabhängigen Energiebedarf.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse aus Tabelle 7.3 mit den zugrundeliegenden Realdaten der Fertigung zeigt, dass die geforderte Bauteilanzahl von 1600 Bauteilen je 24 Stunden nicht erreicht wird, sondern mit 1502 Bauteilen darunterliegt. Die geringere Ausbringungsleistung ist auf die verkleinerten geometrischen Abmessungen des Laborsystems zurückzuführen. Verkürzte Pufferstrecken vor den Maschinen und das kürzere Hauptband führen dazu, dass sich weniger

Bauteile im Gesamtsystem befinden und diese im Falle einer Unterbrechung schneller abgearbeitet werden. Aufgrund des in den Unterbrechungen vorherrschenden temporären Teilemangels verringert sich deshalb die Ausbringungsleistung.

7.3.2.2 Versuch 2: Realbetrieb mit Stand-by-Manager Hartfertigung

Die Ergebniszusammenfassung der Versuchsreihe mit dem Einsatz des Stand-by-Managers als Produktionssteuerungssystem zeigt Tabelle 7.4. In der Versuchszeit von 24 Stunden konnten 1497 Bauteile gefertigt werden. Der Versuch 1, welcher identische Parameter besitzt, jedoch ohne Stand-by-Manager betrieben wird, fertigt 1502 Bauteile. Die Bauteildifferenz beider Versuche ist sehr gering und beträgt 0,33 %. Abweichungen dieser Größenordnung entstehen bei allen durchgeführten Versuchsreihen, unabhängig vom Einsatz des Stand-by-Managers. Auf einem realen Materialflusssystem, welches den Bauteiltransport durch Haftreibung erzeugt, ist es nicht möglich, einen zu 100 % reproduzierbaren Teiletransport abzubilden. Sich unterscheidende Beschleunigungsvorgänge nach einem Bauteilstopp und die durch Reibung in Kurven und Übergangsbereichen reduzierte Transportgeschwindigkeit führen zu geringfügigen Abweichungen im Materialfluss und verursachen kleine Schwankungen der Ausbringungsmenge des Laborsystems.

Eine negative Veränderung der Ausbringungsmenge der Produktionslinie, hervorgerufen durch den Einsatz des Stand-by-Managers, liegt demnach nicht vor. Zudem reduziert sich der spezifische Energiebedarf für die Herstellung eines Bauteils, ausgehend von der im Versuch 1 ermittelten Ausgangsbasis, von 0,7 kWh auf 0,62 kWh je Bauteil. Dies entspricht einer Absenkung des Gesamtenergiebedarfs um 132 kWh (-11,4 %).

Tabelle 7.4: Ergebniszusammenfassung Realbetrieb mit Stand-by-Manager Hartfertigung

Versuchszeit	Bauteile	E_{ges}	$E_{spez.}$		$E_{Zustand}$	Prozentualer Anteil	Zeitlicher Anteil	
24,0 h	1497	927 kWh	0,62 kWh/Stk.		Betriebsbereit	192,5 kWh	22,1%	20,8%
					Bearbeitung	631,5 kWh	67,3%	51,6%
					Störung	35,4 kWh	4,2%	4,6%
					Stand-by LV1	12,7 kWh	1,8%	6,6%
					Stand-by LV2	45,8 kWh	3,6%	6,4%
					Stand-by LV3	9,3 kWh	1,1%	10,0%

Die zeitliche Verteilung der jeweiligen Betriebszustände aller Maschinen zeigt Abbildung 7.16. Die Zustände *Stand-by LV1*, *Stand-by LV2* und *Stand-by LV3* sind die möglichen Stand-by-Betriebsweisen der Maschinen, wobei nicht jede Maschine drei Stand-By-Level besitzt. Durch den Einsatz des *Stand-by-Managers* werden je nach Maschine zwischen 19,7 % und 25,6 % der

Arbeitszeit für einen Stand-by-Betrieb genutzt. Die Auswirkung des jeweiligen Stand-by-Betriebs der Maschine auf den Gesamtenergiebedarf zeigt Abbildung 7.17.

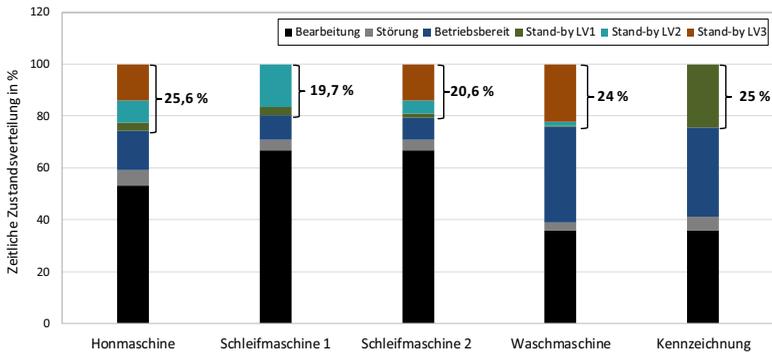


Abbildung 7.16: Zeitliche Verteilung der Betriebszustände der Maschinen (Hartfertigung)

Durch den Einsatz des Stand-by-Managers wird der Energiebedarf aller Maschinen des Laborsystems gesenkt. Der Honprozess verringert seinen Energiebedarf um 7,2 % und die Schleifmaschinen jeweils um 5,2 % und 9,3 %. Die größte Reduktion des Energiebedarfs erfolgt bei der Waschmaschine. Dieser liegt um 23 % unter dem der Ausgangsbasis. Die Maschine zur Bauteilkennzeichnung verringert den Energiebedarf um 18 %, wobei der Anteil am Gesamtenergiebedarf gering ist.

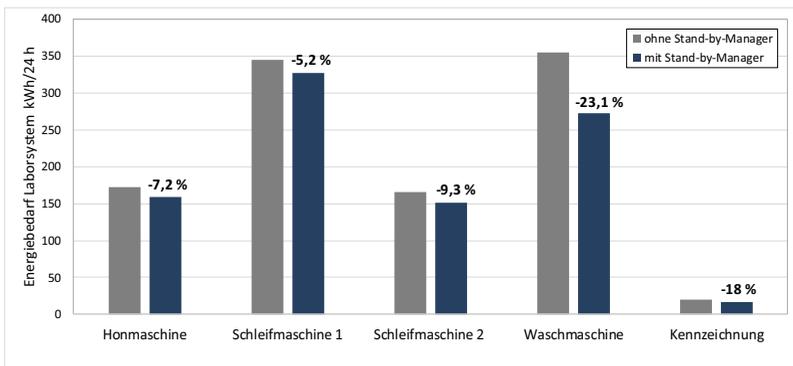


Abbildung 7.17: Energiebedarfsreduktion durch den Einsatz des Stand-by-Managers (Hartfertigung)

Ergebnisinterpretation

Die Ergebnisse der Betriebsphase zeigen, dass der entwickelte Stand-by-Manager am Laborsystem, welches basierend auf realen Produktionsdaten betrieben wird, ohne funktionelle Einschränkungen als Produktionssteuerungssystem eingesetzt werden kann. Eine Analyse der Ausbringungsmenge des Laborsystems zeigt, dass durch den Einsatz des Stand-by-Managers keine Verringerung der produzierten Anzahl an Bauteilen erfolgt. Zudem wird durch den *Stand-by-Manager* der zur Verfügung stehende zeitliche Anteil für einen Stand-by-Betrieb erhöht. Der zeitliche durchschnittliche Anteil des Maschinenzustands *Betriebsbereit* wird ausgehend von der Ausgangsbasis von 43,8 % auf 20,8 % reduziert. Der zeitliche Anteil des Stand-by-Betriebs beträgt 23 % und verringert den Gesamtenergiebedarf um 11,4 % auf 927 kWh. Dies entspricht der Nutzung des Gesamtpotenzials von 30,3 %.

7.3.2.3 Versuch 1: Realbetrieb ohne Stand-by-Manager Grünfertigung

Die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse für die Bestimmung der Ausgangsbasis der Grünfertigung zeigt Tabelle 7.5. In einem Zeitraum von 24 Stunden wurden 973 Bauteile bearbeitet. Der Gesamtenergiebedarf beträgt 1.351 kWh, was einem spezifischen Energiebedarf für die Herstellung eines Bauteils von 1,39 kWh entspricht.

Tabelle 7.5: Ergebniszusammenfassung Realbetrieb ohne Stand-by-Manager Grünfertigung

Versuchszeit	Bauteile	E_{ges}	$\bar{E}_{spez.}$	$\bar{E}_{Zustand}$	prozentualer Anteil	zeitlicher Anteil	
24,0 h	973	1.351 kWh	1,39 kWh/Stk.	Betriebsbereit	625 kWh	39,8%	45,5%
				Bearbeitung	678 kWh	55,9%	49,6%
				Störung	48 kWh	4,3%	4,9%

Die Anzahl der gefertigten Bauteile entspricht annähernd der des Realsystems. Ein Teilmangel im Laborsystem tritt auch bei längeren Pausen nicht auf, da der erste Fräsprozess den Engpass der Arbeitsfolge darstellt und beim Eintreten einer Unterbrechung genügend Bauteile für die Weiterbearbeitung auf dem Laborsystem zur Verfügung stehen.

Eine detaillierte Darstellung der Energiebedarfe der einzelnen Maschinen und deren prozentuale Verteilung zeigt Abbildung 7.18.

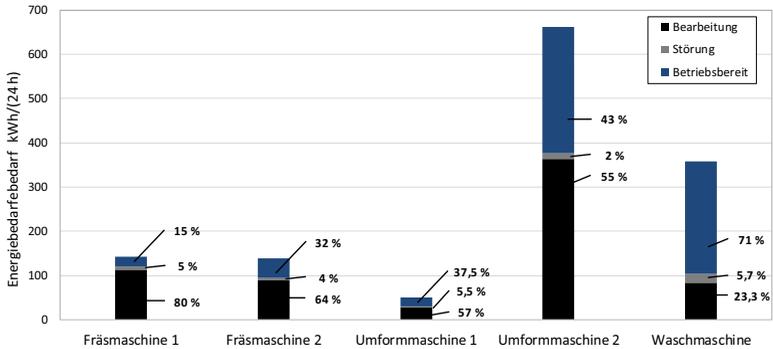


Abbildung 7.18: Energiebedarf Grünfertigung: Versuch 1

Die Umformmaschine 2 dominiert den Gesamtenergiebedarf der Produktionslinie; knapp 50 % der Gesamtenergie entfallen auf diesen Prozess. Zudem besitzt die Umformmaschine 2 mit 43 % einen überdurchschnittlich hohen energetischen Anteil im Zustand *Betriebsbereit*. Vergleichbar zur Hartfertigung benötigt die Waschtechnik auch in der Grünfertigung einen erheblichen Anteil des Gesamtenergiebedarfs bei einer sehr geringen Maschinenauslastung. Der durchschnittliche Energiebedarf im Zustand *Betriebsbereit* beträgt mit 625 kWh ca. 46 % der Gesamtenergie und kann für einen optimierten Stand-by-Betrieb genutzt werden.

7.3.2.4 Versuch 2: Realbetrieb mit Stand-by-Manager Grünfertigung

Zusammenfassend zeigt Tabelle 7.6 die Versuchsergebnisse des Versuchs 2 am Beispiel eines Fertigungsablaufs der Grünfertigung des betrachteten Fertigungssystems.

Tabelle 7.6: Ergebniszusammenfassung Realbetrieb mit Stand-by-Manager Grünfertigung

Versuchszeit	Bauteile	E_{ges}	$E_{spez.}$	$E_{Zustand}$	Prozentualer Anteil	Zeitlicher Anteil	
24,0 h	972	1.179 kWh	1,21 kWh/Stk.	Betriebsbereit	438,7 kWh	30,6%	30,0%
				Bearbeitung	675,4 kWh	62,5%	49,5%
				Störung	48,0 kWh	5,0%	4,9%
				Stand-by LV1	11,9 kWh	1,4%	5,6%
				Stand-by LV2	3,5 kWh	0,5%	5,5%
				Stand-by LV3	1,1 kWh	0,1%	4,4%

In der Versuchszeit von 24 Stunden wurden 972 Bauteile gefertigt. Der Gesamtenergiebedarf der Produktionslinie beträgt dabei 1.179 kWh. Auf die Herstellung eines Bauteils entfallen 1,21 kWh/Stk.. Die Produktionslinie benötigt durchschnittlich 62,5 % der Gesamtenergie für den reinen Bearbeitungsprozess. Weitere 30,6 % entfallen auf einen Bereitschaftsbetrieb. Der Anteil des Stand-by-Betriebs an der Gesamtleistung ist relativ gering und beträgt 2 %. Die zeitliche

Aufteilung der unterschiedlichen Maschinenzustände der einzelnen Maschinen zeigt Abbildung 7.19.

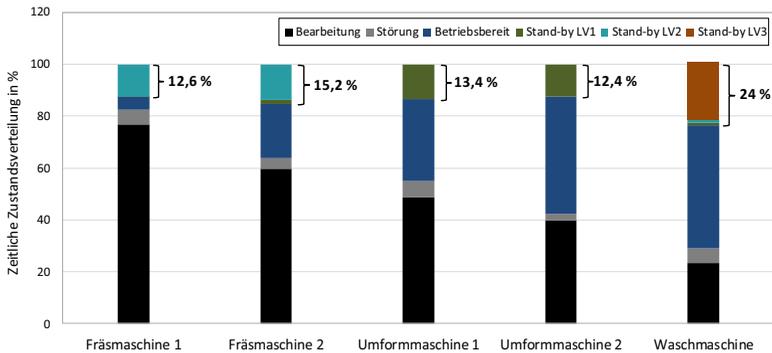


Abbildung 7.19: Zeitliche Verteilung der Betriebszustände der Maschinen (Grünfertigung)

Es ist zu erkennen, dass der Auslastungsgrad entlang der Arbeitsfolge abnimmt. Dies begründet sich durch Taktzeitdifferenzen der einzelnen Maschinen in der Arbeitsfolge. Die Fräsmaschine 1 besitzt die längste Taktzeit und bestimmt somit die Ausbringungsmenge der Produktionslinie. Auch ist erkennbar, dass trotz hoher zeitlicher Anteile im Zustand *Betriebsbereit* der für einen Stand-by-Betrieb nutzbare Anteil gering ist. Dies resultiert aus Kurzstillständen, in denen die Maschinen auf Bauteile aus vorgelagerten Prozessen warten. Diese Zeiten sind i.d.R. nicht für einen Stand-by-Betrieb nutzbar. Die erzielbaren Einsparungen für die untersuchte Produktionslinie zeigt Abbildung 7.20. Die größte prozentuale Absenkung des Energiebedarfs erfolgt, analog zur Hartfertigung, mit 23 % im Bereich der Waschtechnik. Die Fräsmaschinen reduzieren ihren Energiebedarf um 10 % bzw. 12 % und die Umformmaschinen jeweils um 7,3 % bzw. 8,4 %.

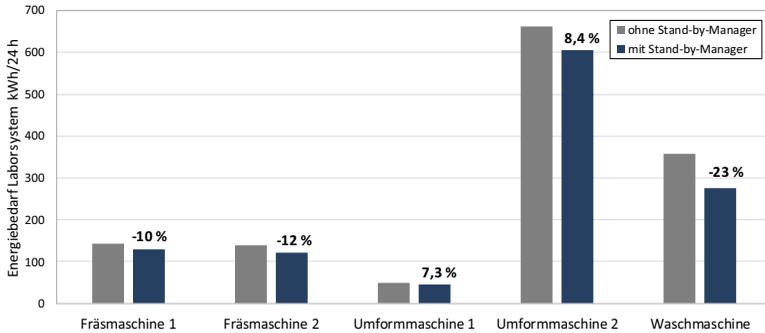


Abbildung 7.20: Energiebedarfsreduktion durch den Einsatz des Stand-by-Managers (Grünfertigung)

Ergebnisinterpretation

Auch bei der untersuchten Arbeitsfolge der Grünfertigung zeigen die Versuchsergebnisse eine ausbringungsneutrale Reduktion des Energiebedarfs durch den Einsatz des Stand-by-Managers als Produktionssteuerungssystem. Der Gesamtenergiebedarf kann von 1.351 kWh auf 1.179 kWh gesenkt werden. Dies entspricht einer Reduktion um 12,7 %, bezogen auf den Gesamtenergiebedarf der im Versuch 1 bestimmten Ausgangsbasis. Der zeitliche Anteil des Bereitschaftsbetriebs verringert sich zudem durchschnittlich von 45,5 % auf 30 %. Ein Stand-by-Betrieb erfolgt in 15,5 % der zur Verfügung stehenden Arbeitszeit.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

In der Automobilindustrie entsteht ein erheblicher Anteil des Gesamtenergiebedarfs in unproduktiven Phasen. In vielen Fällen werden Maschinen und Anlagen in diesen Zeiten in einem energieintensiven Bereitschaftsbetrieb belassen. Der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist ein vollverkettetes Fertigungssystem, welches Zahnräder und Getriebewellen mechanisch bearbeitet. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Entwicklung eines Steuerungsalgorithmus für vollverkettete und vollvernetzte Fertigungssysteme, welcher Maschinen dazu befähigt, auch kurze Pausen für einen Stand-by-Betrieb zu nutzen. Eine anschließende Potenzialstudie und Umsetzungsphase zeigen zudem die realisierbaren energetischen Einsparungen durch den Einsatz des entwickelten Produktionssteuerungsprogramms an ausgewählten Referenzlinien.

Bestehende Studien über das nutzbare energetische Einsparpotenzial durch einen optimierten Stand-by-Betrieb gehen in ihren Ergebnissen stark auseinander. Deshalb erfolgte im Rahmen der Arbeit die Vermessung aller energetisch relevanten Prozesse des betrachteten Fertigungssystems. Dies geschah auf Maschinen- und Komponentenebene. Die Vermessung von 92 Einzelmaschinen zeigt, dass die durchschnittliche Leistungsaufnahme aller Maschinen im Zustand *Warten* bzw. *Betriebsbereit* ca. 70 % der Leistungsaufnahme im Zustand *Arbeitend* beträgt. Zudem konnte gezeigt werden, dass der Grundlastanteil meist nur durch wenige Komponenten der Nebenaggregate verursacht wird. Eine erste Potenzialabschätzung anhand eines idealisierten Fertigungssystems ergab, dass durchschnittlich 38,5 % mehr Energie für die Produktion aufgewendet wird als theoretisch erforderlich ist.

Die wichtigste Entscheidungsgröße zur Einleitung eines wirtschaftlich sinnvollen Stand-by-Betriebs ist die zur Verfügung stehende Zeit der unproduktiven Phasen. Diese ist jedoch nicht exakt bekannt, sodass die Maschine überwiegend in einem betriebsbereiten Zustand verbleibt. Die beschriebenen energetischen Potenziale werden deshalb meist unzureichend ausgeschöpft. Um den Anteil der nutzbaren Zeiten für einen Stand-by-Betrieb zu erhöhen, wurde ein Stand-by-Manager entwickelt, welcher als Produktionssteuerungssystem arbeitet und in Abhängigkeit der aktuellen Produktionssituation für jede Maschine des Fertigungssystems prognostiziert, wann ein Maschinenstillstand eintritt und wie lange dieser dauern wird. Diese Informationen werden an die Maschinen übergeben, sodass für die nutzbaren Zeiten ein energieoptimaler Zustand eingenommen werden kann. Die Berechnung der Pausenzeit erfolgt mithilfe statischer und dynamischer Daten des Fertigungssystems. Die statischen Daten enthalten Informationen der Produktionsplanung und werden genutzt, um langfristig geplante Events, wie z.B. eine Freischicht, zu berücksichtigen. Die dynamischen Daten bestehen überwiegend aus Sensordaten des Verkettungssystems und werden verwendet, um zeitliche und örtliche Unterbrechungen im Materialfluss zu berechnen. Der Stand-by-Manager wurde auf verschiedenen Entwicklungsumgebungen programmtechnisch umgesetzt. Neben der Entwicklung in einer Simulationsumgebung erfolgte die Implementierung auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung sowie auf einer PC-basierten Hochsprachenapplikation. Für die im Fertigungssystem enthaltenen Hauptprozesse wurden Anbindungskonzepte entwickelt, welche für verschiedene Hon-, Schleif-, Fräs-, Dreh-, Umform-, und Waschmaschinen maschinenspezifische Abschaltstrategien aufzeigen.

Der entwickelte Stand-by-Manager und die maschinenspezifischen Abschaltstrategien wurden anschließend in einer Potenzialstudie energetisch bewertet. Für diese erfolgte die Modellierung des untersuchten Fertigungssystems in einer Simulationsumgebung. In einzelnen Teilmodellen wurden die verschiedenen Elemente des Transfersystems, die Maschinen sowie verschiedene übergeordnete Produktionssteuerungsmechanismen entwickelt. Durch eine anschließende Verknüpfung der einzelnen Teilmodelle konnten verschiedene Produktionslinien des Fertigungssystems nachgebildet werden.

In der Potenzialstudie wurde ausgehend von einer idealisierten Produktionslinie, welche aus Hon-, Schleif- und Waschprozessen besteht, das theoretisch erzielbare energetische Einsparpotenzial eines Stand-by-Betriebs bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass selbst in einer gut abgestimmten ungetakteten Reihenfertigung, bedingt durch Taktzeitdifferenzen, Kurzstillstände einzelner Maschinen entstehen. Diese Kurzstillstände, die erforderlichen Rüstvorgänge, die auftretenden Störungen und die organisatorisch bedingten Unterbrechungen in der

Teileversorgung führen dazu, dass der erforderliche Energiebedarf der Produktionslinie ca. 30 % höher liegt als theoretisch erforderlich. Daran anschließend wurden verschiedene Stand-by-Strategien untersucht. Verglichen wurden die erzielbaren Energieeinsparungen konventioneller Stand-by-Strategien mit denen des entwickelten Stand-by-Managers. Es konnte gezeigt werden, dass ein ausbringungsneutraler Stand-by-Betrieb durch einen automatisch eingeleiteten Stand-by-Betrieb nicht möglich ist. Auch die erzielbaren Einsparungen waren bei dieser Strategie am geringsten. Übernimmt ein Mitarbeiter das Stand-by-Management der Maschinen, so ist eine ausbringungsneutrale Reduktion des Energiebedarfs möglich. Die energetischen Einsparungen liegen dabei über denen des automatisch eingeleiteten Stand-by-Betriebs und unter denen des Stand-by-Managers. Der Stand-by-Manager erzielte in allen untersuchten Fällen die durchschnittlich höchste energetische Einsparung der verglichenen Abschaltstrategien. Je nach Untersuchungsszenario konnte eine Reduktion des Gesamtenergiebedarfs zwischen 7,9 % und 17,8 % erzielt werden, bei einer durchschnittlichen Ausschöpfung des Gesamtpotenzials zwischen 50 % und 67 %. Hervorzuheben ist, dass der Stand-by-Manager die einzige Abschaltstrategie ist, welche es ermöglicht, auch kurze Unterbrechungen im Produktionsablauf ohne Ausbringungsverluste für einen Stand-by-Betrieb zu nutzen.

Anschließend an die simulative Potenzialstudie erfolgte eine Test- und Betriebsphase des Stand-by-Managers an einem Laborsystem, welche im Wesentlichen dem Aufbau einer realen Produktionslinie entspricht. Das Laborsystem enthält Maschinenmodelle, welche durch ein Kettenfördersystem miteinander verbunden sind. Die Materialflusssteuerung erfolgt über eine speicherprogrammierbare Steuerung, welche in Kombination mit einem Ident-System anhand spezifischer Bauteilinformationen den Betrieb verschiedener Materialflusssteuerungsmethoden ermöglicht. In einem Integrations- und Systemtest konnte die einwandfreie Funktion des Stand-by-Managers in einer anwendungsnahen Produktionsumgebung nachgewiesen werden. Aufbauend darauf folgte eine Betriebsphase, in welcher der Stand-by-Manager als Produktionssteuerungssystem eingesetzt wurde. Die Betriebsphase des Stand-by-Managers am Laborsystem untersuchte Fertigungsabläufe von zwei verschiedenen Produktionslinien anhand realer Produktionsdaten. Mit diesen konnte gezeigt werden, dass der Einsatz des Stand-by-Managers keinen Einfluss auf die Ausbringungsmenge der einzelnen Produktionslinien hat. Zudem wurde gezeigt, dass sich der Gesamtenergiebedarf der untersuchten Produktionslinien durch den Einsatz des Stand-by-Managers um 11,4 % bzw. 12,8 % senken lässt.

Auch durch den Einsatz des Stand-by-Managers wird es künftig nicht möglich sein, den Energiebedarf in unproduktiven Zeiten gänzlich zu beseitigen. Dennoch konnte gezeigt werden, dass im Vergleich zu konventionellen Strategien, welche durchschnittlich nur 10 % des

Gesamtpotenzials ausschöpfen, eine Steigerung auf bis zu 67 % möglich ist. Ein weiterer wichtiger Schritt für eine konsequente Senkung des Energiebedarfs in unproduktiven Zeiten ist zukünftig die Optimierung der maschinenspezifischen Abschaltstrategien. Die Praxis zeigt, dass in diesem Bereich an aktuellen Maschinen, meistens allein durch eine steuerungstechnische Anpassung des Betriebsverhaltens, eine signifikante Absenkung der Leistungsaufnahme in Stillstandszeiten erreicht werden kann. Aktuell fokussiert sich der Einsatz des Stand-by-Managers auf eine vollverkettete und vollvernetzte mechanische Fertigung. Der Ansatz ist jedoch gut auf andere Bereiche anwendbar. So kann der Stand-by-Manager, ohne Anpassungen der bestehenden Berechnungsgrundlage, auch in Montagebereichen der Automobilproduktion eingesetzt werden und dort das Energiemanagement der einzelnen Teilstationen übernehmen. Aktuell erfolgt im Rahmen eines EXIST-Gründerstipendiums des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (FKZ: 03EGSHE145) die Weiterentwicklung des vorgestellten Stand-by-Managers. Das entwickelte marktfähige Produkt wird anschließend in einem Pilotprojekt in der Automobilindustrie zur Anwendung kommen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Lebenszykluskosten einer Werkzeugmaschine	6
Abbildung 2.2: Qualitative Zustandsbeschreibung der Bedarfsgruppen	7
Abbildung 2.3: Prozentuale Energiekostenverteilung einer Werkzeugmaschine.....	8
Abbildung 2.4: Stoffströme einer Werkzeugmaschine	10
Abbildung 2.5: Die Automatisierungspyramide.....	12
Abbildung 2.6: Betriebsinterner Materialfluss einer Bauteilfertigung.....	14
Abbildung 2.7: Ablaufart der Teilefertigung	15
Abbildung 3.1: Vorgehensmodell der Mustererkennung	25
Abbildung 3.2: Beispiel einer automatischen Analyse von Maschinenzuständen.....	26
Abbildung 3.3: Analyseverfahren zur Maschinenzustandsbestimmung (Teil 1).....	27
Abbildung 3.4: Analyseverfahren zur Maschinenzustandsbestimmung (Teil 2).....	28
Abbildung 3.5: Stückzahlenermittlung anhand von Energiedaten	30
Abbildung 3.6: Materialflussermittlung anhand von Energiedaten.....	32
Abbildung 3.7: Veränderung des Energieverlaufs einer WZM aufgrund von Werkzeugverschleiß.....	33
Abbildung 3.8: Elektrische durchschnittliche Gesamtleistung der Bauteilfertigung (Top-down).....	36
Abbildung 3.9: Prozentuale Prozessverteilung der Bauteilfertigung	37
Abbildung 3.10: Exemplarische Leistungsverläufe der Hauptprozesse	38
Abbildung 3.11: Durchschnittliche Leistungen der Hauptprozesse	39
Abbildung 3.12: Leistungsverlauf einzelner Komponenten einer Fräsmaschine	41
Abbildung 3.13: Komponentenmessung einer Schleif- und Fräsmaschine.....	42
Abbildung 3.14: Komponentenmessungen von Honmaschinen.....	43
Abbildung 3.15: Komponentenmessungen einer Wasch- und Drehmaschine	43
Abbildung 3.16: Komponentenmessung einer Umformmaschine.....	44
Abbildung 3.17: Relative Häufigkeitsverteilung von Unterbrechungen im Produktionsablauf	45
Abbildung 3.18: Zeitlicher Anteil an Produktionsunterbrechungen	46

Abbildung 4.1: Referenzfertigungssystem zur Entwicklung des Stand-by-Managers.....	50
Abbildung 4.2: Konzeptbeschreibung des Stand-by-Managers	52
Abbildung 4.3: Grundlogik des Stand-by-Managers	53
Abbildung 4.4: Aufbau eines entkoppelten Fertigungssystems.....	54
Abbildung 4.5: Funktionen des Stand-by-Managers.....	55
Abbildung 4.6: Beispiel der Hochlaufzeitminimierung.....	58
Abbildung 4.7: Fallbeispiele der Zeitenberechnung	62
Abbildung 4.8: Fallunterscheidung der Ankunftszeitberechnung.....	64
Abbildung 4.9: Ankunftszeitberechnung für komplexe Routen.....	65
Abbildung 4.10: Skalierungsmodell des Stand-by-Managers.....	66
Abbildung 4.11: Programmstruktur des Stand-by-Managers	68
Abbildung 4.12: Beispiel für die Segmentierung des Fertigungssystems.....	69
Abbildung 4.13: Beispiel einer maschinenspezifischen Abschaltstrategie.....	70
Abbildung 5.1: Fertigungsablauf der Bauteilfertigung.....	78
Abbildung 5.2: Einzelmodule des Transfersystems einer Produktionslinie	80
Abbildung 5.3: Vereinfachter Funktionsablaufplan der Materialflusssteuerung.....	82
Abbildung 5.4: Modell der Teilebereitstellung	83
Abbildung 5.5: Modelle der Maschinenzuführung und des Maschinenpuffers.....	85
Abbildung 5.6: Modelle der Förderstrecken und Wendestation	85
Abbildung 5.7: Energiebedarfe einer WZM auf Komponentenebene	87
Abbildung 5.8: Lineare Approximation eines Energieprofils.....	87
Abbildung 5.9: Zeitdiskrete Zuordnung des Energieverlaufs	88
Abbildung 5.10: Zerlegung eines Energieprofils in Energieblocks	88
Abbildung 5.11: Betriebszustände von Werkzeugmaschinen nach VDMA Einheitsblatt 34179.....	90
Abbildung 5.12: Systemanalyse der Arbeitsfolgen und deren Linienzuordnung	93
Abbildung 5.13: Gesamtmodell der Produktionslinie 11	94
Abbildung 6.1: Die sechs Verlustbringer der OEE-Kennzahl	96
Abbildung 6.2: Nutzbare Bearbeitungszeiten der Produktionslinie 11.....	98
Abbildung 6.3: Taktabstimmungsdiagramm der Produktionslinie 11.....	99
Abbildung 6.4: Einsparpotenzial der Produktionslinie 11	100
Abbildung 6.5: Potenziale der unterschiedlichen Einsparstrategien	103
Abbildung 6.6: Verteilfunktionen der entstehenden Unterbrechung bei der Teilebereitstellung	105
Abbildung 6.7: Ausbringungsleistungen für verschiedene Unterbrechungsverteilungen	106
Abbildung 6.8: Energiebedarf verschiedener Stand-by-Strategien bei langen Unterbrechungen	107
Abbildung 6.9: Energiebedarf verschiedener Stand-by-Strategien bei kurzen Unterbrechungen	107
Abbildung 6.10: Energiebedarf verschiedener Stand-by-Strategien bei gleich langen Unterbrechungen ..	108
Abbildung 6.11: Energiebedarf je Bauteil bei verschiedenen Abschaltstrategien	109
Abbildung 6.12: Energiebedarf je Bauteil bei verschiedenen Ausbringungsleistungen	111
Abbildung 6.13: Energiebedarf je Bauteil bei unterschiedlichen Maschinenverfügbarkeiten	112
Abbildung 6.14: Energiebedarf je Bauteil bei unterschiedlichen Instandsetzungszeiten	113

Abbildung 7.1: Foto der Verkettungsanlage bzw. des Laborsystems	116
Abbildung 7.2: Schematischer Aufbau des Laborsystems	116
Abbildung 7.3: Sensorplan des Laborsystems.....	117
Abbildung 7.4: Automatisierungskonzept des Laborsystems	120
Abbildung 7.5: Datenstruktur des RFID-Transponder zur Materialflusssteuerung.....	121
Abbildung 7.6: Bauteilsteuerung in den Weichenbereichen	121
Abbildung 7.7: Vernetzung der Teilsysteme des Versuchsumfelds	122
Abbildung 7.8: Konfigurationsmaske des Stand-by-Managers	124
Abbildung 7.9: Ergebnisse Systemtest 1 (getakteter Materialfluss)	127
Abbildung 7.10: Ergebnisse Systemtest 2: (getakteter Materialfluss mit Berechnungskorrektur)	128
Abbildung 7.11: Ergebnisse Systemtest 3: (Bauteilmix mit Berechnungskorrektur)	129
Abbildung 7.12: Ergebnisse Systemtest 3: (Darstellung der Ankunftszeitkorrektur).....	130
Abbildung 7.13: Ergebnisse Systemtest 4: (Störzeitmanagement).....	131
Abbildung 7.14: Arbeitsfolgen und Parameter der Betriebsphase	133
Abbildung 7.15: Energiebedarf der Hartfertigung: Versuch 1	135
Abbildung 7.16: Zeitliche Verteilung der Betriebszustände der Maschinen (Hartfertigung)	137
Abbildung 7.17: Energiebedarfsreduktion durch den Einsatz des Stand-by-Managers (Hartfertigung).....	137
Abbildung 7.18: Energiebedarf Grünfertigung: Versuch 1.....	139
Abbildung 7.19: Zeitliche Verteilung der Betriebszustände der Maschinen (Grünfertigung).....	140
Abbildung 7.20: Energiebedarfsreduktion durch den Einsatz des Stand-by-Managers (Grünfertigung) ...	141
Abbildung A1: Abschaltstrategie einer Honmaschine	XXVII
Abbildung A2: Abschaltstrategie einer Schleifmaschine.....	XXVIII
Abbildung A3: Abschaltstrategie einer Schleifmaschine.....	XXVIII
Abbildung A4: Abschaltstrategie einer Waschmaschine	XXVIII
Abbildung A5: Abschaltstrategie einer Fräsmaschine	XXVIII
Abbildung A6: Abschaltstrategie einer Drehmaschine	XXVIII
Abbildung A7: Abschaltstrategie einer Drehmaschine	XXVIII
Abbildung A8: Abschaltstrategie einer Drehmaschine	XXIX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Übersicht möglicher Nebenaggregate von WZM	10
Tabelle 3.1: Messdatengrundlage und deren Auflösung	24
Tabelle 3.2: Untersuchte Einzelprozesse der Potenzialstudie	35
Tabelle 3.3: Auszug aus der Auswertung der Maschinenanalyse	38
Tabelle 4.1: Variablenbeschreibung der Ankunftszeitenberechnung	62
Tabelle 4.2: Variablenbeschreibung des Skalierungsmodells	67
Tabelle 4.3: Maschinenspezifische Abschaltstrategie einer Schleifmaschine	71
Tabelle 4.4: Maschinenspezifische Abschaltstrategie einer Fräsmaschine	72
Tabelle 5.1: Integrierte Abschaltstrategien der Maschinenmodelle	91
Tabelle 6.1: Durchschnittliche Energiebedarfe verschiedener Maschinen	102
Tabelle 7.1: Technische Daten des Laborsystems	118
Tabelle 7.2: Auszug der Versuchsmatrix des Störzeitmanagements	131
Tabelle 7.3: Ergebniszusammenfassung: Realbetrieb ohne Stand-by-Manager Hartfertigung	134
Tabelle 7.4: Ergebniszusammenfassung Realbetrieb mit Stand-by-Manager Hartfertigung	136
Tabelle 7.5: Ergebniszusammenfassung Realbetrieb ohne Stand-by-Manager Grünfertigung	138
Tabelle 7.6: Ergebniszusammenfassung Realbetrieb mit Stand-by-Manager Grünfertigung	139

Literaturverzeichnis

- Abele, Eberhard; Benjamin, Kuhrke; Rothenbücher, Stefan (2011a). *Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen*. Hg. v. Technische Universität Darmstadt (PTW). Darmstadt.
- Abele, Eberhard; Dittrich, Michael; Eisele, Christian; Kessing, Oliver; Klöblen, Wolfgang; Rudolph, Mathias; Rummel, Wolfgang (2013). *Energieeffiziente Produktionsmaschinen durch Simulation in der Produktionsumgebung. Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojekts eSimPro*. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Berlin.
- Abele, Eberhard; Panten, Niklas; Menz, Benjamin (2015). Data Collection for Energy Monitoring Purposes and Energy Control of Production Machines, S. 299–304. In: *Procedia CIRP*. 29.
- Abele, Eberhard; Sielaff, Tilo; Schiffler, Andreas; Rothenbücher, Stefan (2011b). Analyzing Energy Consumption of Machine Tool Spindle Units and Identification of Potential for Improvements of Efficiency. In: *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, S. 280–285, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2015). *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland*. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. Berlin.
- Arnold, Dieter; Furmans, Kai (2007). *Materialfluss in Logistiksystemen*. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Avram, Oliver Ioan; Xirouchakis, Paul (2011). Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system, S. 699–711. In: *Journal of Cleaner Production*. 19, Nr. 6-7.
- Balci, O. Verification, validation, and certification of modeling and simulation applications. In: *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, S. 150–158.

- Bittencourt, José Luiz (2013). *Selbstoptimierende und bedarfsgerechte Steuerungsstrategien für Werkzeugmaschinen zur Steigerung der Energieeffizienz*. 1. Aufl. Aachen: Apprimus Verlag.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2014). *Aktionsprogramm Klimaschutz 2020. Kabinettsbeschluss vom 03.12.2014*. Berlin.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2015). *Klimaschützer schreiben Geschichte*. Hg. v. BMUB. Berlin (344, 15). Online verfügbar unter www.bmub.bund.de/N52703/, zuletzt geprüft am 27.02.2015.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB); Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle (2014). *Kernbotschaften des Fünften Sachstandsberichts des IPCC. Klimaänderung 2014: Synthesebericht*. Hg. v. BMUB, BMBF und Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle. Online verfügbar unter http://www.fona.de/mediathek/pdf/Kernbotschaften_IPCC_AR5_SYR.pdf, zuletzt geprüft am 03.07.2016.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2012). *Die Energiewende in Deutschland. Mit sicherer, bezahlbarer und umweltschonender Energie ins Jahr 2050*. Hg. v. BMWi. Berlin.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2013). *Energiekosten in der Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen in Deutschland in den Jahren 1997 bis 2011*. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Berlin.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015). *EU-Energieeffizienz-Richtlinie*. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energieeffizienz/eu-energieeffizienz-richtlinie.html>, zuletzt geprüft am 27.02.2016.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016). *Entwicklung von Energiepreisen und Preisindizes*. Hg. v. BMWi. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/energiepreise-energiekosten.html>, zuletzt geprüft am 27.02.2016.
- Brause, Rüdiger (2005). *Kompendium der Informationstechnologie. Hardware, Software, Client-Server-Systeme, Netzwerke, Datenbanken*. Heidelberg: Springer Verlag.
- Burnus, Heinz (2008). *Datenbankentwicklung in IT-Berufen. Eine praktisch orientierte Einführung mit MS Access und MySQL*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Daimler AG (2014). *Nachhaltigkeitsbericht 2014*. Hg. v. Daimler AG. Stuttgart.
- Dervisopoulos, Marina (2005). *Life Cycle Costs Transparent*. Hg. v. Technische Universität Darmstadt (PTW). Darmstadt.

- Diaz, Nancy; Redelsheimer, E.; Dornfeld, David (2011). Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use. In: *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, S. 263–267, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag.
- Dickmann, Philipp (Hg.) (2007). *Schlanker Materialfluss mit Lean Production, Kanban und Innovationen. Mit 16 Tabellen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer VDI Verlag.
- DMG Mori Company Limited (2016). *Bis zu 30% Energie sparen und Produktivität steigern*. Hg. v. DMG Mori Company Limited. Online verfügbar unter <http://de.dmgmori.com/energy/dmg-energy-saving>, zuletzt geprüft am 13.06.2016.
- Dombrowski, Uwe; Mielke, Tim (Hg.) (2015). *Ganzheitliche Produktionssysteme. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Dufflou, Joost R.; Sutherland, John W.; Dornfeld, David; Herrmann, Christoph; Jeswiet, Jack; Kara, Sami et al. (2012). Towards energy and resource efficient manufacturing, S. 587–609. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 61, Nr. 2.
- Eberspächer, Philipp; Verla, Alexander (2013). Realizing Energy Reduction of Machine Tools Through a Control-integrated Consumption Graph-based Optimization Method, S. 640–645. In: *Procedia CIRP*. 7.
- Erlach, Klaus (2010). *Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- VDI 5600 (2015). *Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems – MES)*. Berlin: Beuth Verlag.
- Friedrich, Andreas David (2009). *Anwendbarkeit von Methoden und Werkzeugen des konventionellen Softwareengineering zur Modellierung und Programmierung von Steuerungssystemen*. Kassel: Kassel University Press.
- Frithjof, Klasen (2011). *ProfiEnergy die gemessene Einsparung*. Hg. v. WEKA FACHMEDIEN GmbH. Haar.
- Gleason-Pfauter Maschinenfabrik GmbH. *Gleason Energy Saver Package zur Einsparung von Energie während die Maschine auf Nachschub von Rohlingen wartet*. Hg. v. Gleason-Pfauter Maschinenfabrik GmbH. Online verfügbar unter http://www.gleason-pfauter.ch/service/Flyer%20Eco_Packet_DT_2011_05_27.pdf, zuletzt geprüft am 15.06.2016.
- Grundig, Claus-Gerold (2012). *Fabrikplanung Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*. 4. Aufl. Carl Hanser Fachbuchverlag.
- Gutowski, Timothy; Murphy, Cynthia; Allen, David; Bauer, Diana; Bras, Bert; Piwonka, Thomas et al. (2005). Environmentally benign manufacturing: Observations from Japan,

- Europe and the United States, S. 1–17. In: *Journal of Cleaner Production*. 13, Nr. 1.
- Heidenhain (2010). *Aspekte der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen*. Hg. v. Dr. Johannes Heidenhain GmbH. Traunreut.
- Herbertz, Rainer; Hermann, Harald; Labs, Rainer (2013). *Massivumformung kurz und bündig*. Hg. v. Hans Ulrich Volz, Industrieverband Massivumformung e. V..
- Hirsch, Andreas (2012). *Werkzeugmaschinen. Grundlagen, Auslegung, Ausführungsbeispiele*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag.
- Junge, Mark (2007). *Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung*. Kassel: Kassel University Press.
- VDI-Richtlinie 3300 (2007). *Kosten des Materialflusses*. Berlin: Beuth Verlag.
- Kropik, Markus (2009). *Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Kuhrke, Benjamin (2011). *Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen*. Berlin: Neopubli.
- Lau, Ho-Man (2016). *Entwicklung eines Stand-by-/Operationalmanagers für die energieeffiziente Steuerung von Maschinen und Anlagen*. Masterarbeit, Universität Kassel, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse.
- Lauven, Lars; Wiedenmann, Susanne; Geldermann, Jutta (2010). *Lebenszykluskosten als Entscheidungshilfe beim Erwerb von Werkzeugmaschinen*. Hg. v. Schwerpunkt Unternehmensführung Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen.
- Lödding, Herrmann (2008). *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Max Felser. Standby für Roboter. In: *SE STZ automate now*. 08/2010.
- Mechs, Sebastian; Lamparter, Steffen; Peschke, Jörn (2012). Steigerung der Energieeffizienz in Automatisierungssystemen durch Start-Stopp-Automatik. In: *Automation 2012*, S. 251–254. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Mechs, Sebastian; Lamparter, Steffen; Peschke, Jörn; Müller, Jörg P. (2013). *Start-Stopp-Automatik für Nicht-Produktivphasen*. Hg. v. Deutscher Industrieverlag. München.
- Müller, Egon; Engelmann, Jörg; Löffler, Thomas; Strauch, Jörg (2009). *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

- Neugebauer, Reimund (Hg.) (2010). *Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. Tagungsband 1. Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters EniPROD*. Technische Universität Chemnitz; Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters EniPROD. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten.
- Neugebauer, Reimund (2012). *Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Niemann, Heinrich (1983). *Klassifikation von Mustern*. Berlin: Springer Verlag.
- Perovic, Bozina (2006). *Handbuch Werkzeugmaschinen. Berechnung, Auslegung und Konstruktion*. München, Wien: Hanser.
- Peter, Wolfgang (2016). *SPS basierte Entwicklung und Optimierung einer intelligenten Materialflussteuerung zur Senkung des Energiebedarfs in produktionsfreien Zeiten*. Masterarbeit. Universität Kassel, Fachgebiet Umweltgerechte Produkte und Prozesse.
- PROFIBUS Nutzerorganisation e. V. (2011). *Assessing PROFlenergy's potential. Quantifying the energy saving possibilities of PI's PROFlenergy profile for PROFINET and assessing its deployment opportunities*. Hg. v. PROFIBUS Nutzerorganisation e. V..
- PROFIBUS Nutzerorganisation e. V. (Hg.) (2016). *PROFlenergy Energiekosten senken einfach und herstellerunabhängig*.
- Rabe, Markus; Spiekermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008). *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Radvanovsky, Robert; Brodski, Yaakov (2013). *Handbook of SCADA/control systems security*. Boca Raton: CRC Press.
- Rücker, Thomas (2006). *Optimale Materialflussteuerung in heterogenen Produktionssystemen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.
- Rummel, Wolfgang (2013). *Energieeffiziente Produktionsmaschinen - Bewertung und Potentialabschätzung aus Sicht des Maschinenherstellers*.
- Sauter, Thilo (2007). The continuing evolution of integration in manufacturing automation, S. 10–19. In: *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 1, Nr. 1.
- Schäfer, Mirko (2013). *Entwicklung eines Regelungskonzepts zur bedarfsgerechten Lüftung von Produktionshallen. Experimentelle Untersuchungen und Simulation*. Kassel: Kassel University Press.

- Schenk, Michael; Wirth, Siegfried; Müller, Egon (2014). *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg.
- Schicker, Edwin (2014). *Datenbanken und SQL. Eine praxisorientierte Einführung mit Anwendungen in Oracle, SQL Server und MySQL*. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Schlechtendahl, Jan (2012). *Whitepaper sercos ENERGY Deutsche Ausgabe*. 2. Aufl. Hg. v. Sercos International e. V.
- Schlechtendahl, Jan; Eberspächer, Philipp; Haag, Holger; Verl, Alexander; Westkämper, Engelbert (2013). Framework for Controlling Energy Consumption of Machine Tools. In: *EcoProduction and Logistics*, S. 155–168, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Schlüter, Alexander (2013). *Beitrag zur thermischen Energieversorgung in der Kunststoffverarbeitung. Systemische Lösungen und Potenziale*. Kassel: Kassel University Press.
- Schmitt, Robert; Bittencourt, José Luiz; Bonefeld, Ralf (2011). Modelling Machine Tools for Self-Optimisation of Energy Consumption. In: *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, S. 253–257, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Schneider, Herfried; Buzacott, John A.; Rücker, Thomas (2005). *Operative Produktionsplanung und -steuerung*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Schöfberger, Werner; Blumauer, Gottfried; Bachl, Markus; Traxler, Rudolf; Petzl, Barbara; Leutgöb, Manfred et al. (2010). *Abschaltbare Fabrik. Zentrale Leittechnik und Gesamtkonzept zu Energieeinsparungen und zur Ressourcenoptimierung im Standby Betrieb von Industrieanlagen*. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit). Wien.
- Schön, Bernhard (2013). *Umwelterklärung 2012/2013 BMW Standort Regensburg*. Hg. v. BMW AG. München.
- Schröter, Marcus; Weißfloch, Ute; Buschak, Daniela (2009). *Energieeffizienz in der Produktion – Wunsch oder Wirklichkeit? Energieeinsparpotenziale und Verbreitungsgrad energieeffizienter Techniken*. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe.
- Siemens AG (2011). *Energieeffiziente Werkzeugmaschinen mit Sinumerik Ctrl-Energy von Siemens sind sparsam und produktiv*. Hg. v. Siemens AG. Online verfügbar unter http://www.siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/2011/drive_technologies/IDT2_011073038d.pdf, zuletzt geprüft am 13.06.2016.
- Volkswagen Aktiengesellschaft (2014). *Nachhaltigkeitsbericht 2014*. Hg. v. Volkswagen Aktiengesellschaft. Wolfsburg.

- Weinert, Nils; Mose, Christian (2014). Investigation of Advanced Energy Saving Stand by Strategies for Production Systems, S. 90–95. In: *Procedia CIRP*. 15.
- Weinert, Nils; Seliger, Günther (Hg.) (2010). *Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Weiss, Lukas (2014). *Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen – Der schwierige Weg zur Entwicklung der Normenreihe ISO 14955*. Wien. Online verfügbar unter http://www.produktionstechnik.at/fileadmin/wpk/doc/2014_Vortraege/4b_Werkzeugmasc_hinen/4_Energieeffizienz_von_Werkzeugmaschinen.pdf, zuletzt geprüft am 15.06.2015.
- Will, Dieter; Gebhardt, Norbert (2011). *Hydraulik. Grundlagen, Komponenten, Schaltungen*. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Wolff, Daniel; Kulus, Dennis; Nagel, Joachim (2013). Simulationsgestützte Bewertung von Energieeinsparstrategien. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*.
- Wolff, Daniel; Hundt, L.; Dreher, Stefan. (2013). Requirements on the engineering of advanced standby strategies in automobile production. In: *Innovative solutions*, Berlin, Universitätsverlag der TU.
- Zein, André (2012). *Transition Towards Energy Efficient Machine Tools*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Zirn, Oliver; Weikert, Sascha (2006). *Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme. Eine praxisnahe Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Anhang

A. Abschaltstrategien verschiedener Maschinen

Die Abbildungen A1 bis A8 zeigen Abschaltstrategien, welche im Rahmen der in Kapitel 3 durchgeführten Potenzialstudie entstanden sind. Dargestellt sind die Leistungsbedarfe der Maschinen in den Betriebszuständen *Arbeitend*, *Betriebsbereit* und *Stand-by*. Zusätzlich sind für die Komponenten und Funktionsbaugruppen die jeweiligen Betriebsmodi den Maschinenzuständen zugeordnet. Ist eine Komponente als *An* dargestellt, benötigt sie i.d.R. die Leistungsaufnahme wie im Zustand *Arbeitend*. Der Betriebsmodus *Gedrosselt* verringert die Leistungsaufnahme der Komponente. Jedoch ist ein schnelles Verlassen dieses Modus meist noch möglich. Ist eine Komponente *Aus*, erfolgt keine Leistungsaufnahme. In Abhängigkeit des jeweiligen Prozesses, kann das Einnehmen dieses Zustands mit Hoch- und Nachlaufzeiten verbunden sein.

	Hauptprozess				Leistung	Komponenten			
	$t_{\text{runderfahren}}$	t_{min}	$t_{\text{hochfahren}}$	t_{standby}		Servoantriebe	Rückölpumpe	Ölschleuder	Bandförderer
Arbeitend					8,95 kW	An	An	An	An
Betriebsbereit					4,90 kW	Gedrosselt	Gedrosselt	Gedrosselt	An
Stand-by 1	0,5 min	1,0 min	0,5 min	2,0 min	4,52 kW	Aus	Gedrosselt	Gedrosselt	Aus
Stand-by 2	0,0 min	5,0 min	1,0 min	6,0 min	4,38 kW	Aus	Gedrosselt	Gedrosselt	Aus
Stand-by 3	6,0 min	21,0 min	1,0 min	28,0 min	2,20 kW	Aus	Aus	Gedrosselt	Aus

Abbildung A1: Abschaltstrategie einer Honmaschine

Schleifprozess 1					Komponenten				
	t _{unterfahren}	t _{min.}	t _{hochfahren}	t _{standby}	Leistung	NC-Achsen	KSS-Druckerhöhung	Hydraulikkühlung	Nebenaggregate
Arbeitend					15,20 kW	An	An	An	An
Betriebsbereit					12,20 kW	Gedrosselt	An	An	An
Stand-by 1	1,0 min	1,0 min	1,0 min	3,0 min	8,60 kW	Gedrosselt	Gedrosselt	An	An
Stand-by 2	10,0 min	0,0 min	0,0 min	10,0 min	8,27 kW	Gedrosselt	Aus	An	Aus
Stand-by 3	10,0 min	20,0 min	90,0 min	120,0 min	2,00 kW	Aus	Aus	Aus	Aus

Abbildung A2: Abschaltstrategie einer Schleifmaschine

Schleifprozess 2					Komponenten				
	t _{unterfahren}	t _{min.}	t _{hochfahren}	t _{standby}	Leistung	NC-Achsen	KKS-HP	KSS-NP	Nebenaggregate
Arbeitend					8,10 kW	An	An	An	An
Betriebsbereit					4,30 kW	Gedrosselt	Gedrosselt	Gedrosselt	Gedrosselt
Stand-by 1	1,0 min	0,0 min	0,0 min	1,0 min	3,32 kW	Gedrosselt	Gedrosselt	Aus	Gedrosselt
Stand-by 2	2,0 min	1,0 min	0,0 min	3,0 min	3,25 kW	Gedrosselt	Aus	Aus	Gedrosselt
Stand-by 3	1,0 min	10,0 min	3,0 min	14,0 min	1,80 kW	Aus	Aus	Aus	Gedrosselt

Abbildung A3: Abschaltstrategie einer Schleifmaschine

Waschprozess					Komponenten				
	t _{unterfahren}	t _{min.}	t _{hochfahren}	t _{standby}	Leistung	Trocknung	Absaugpumpe	Lufterhitzer	Kondensator
Arbeitend					14,60 kW	An	An	An	An
Betriebsbereit					14,60 kW	An	An	An	An
Stand-by 1	1,0 min	0,0 min	0,0 min	1,0 min	10,46 kW	An	Aus	An	An
Stand-by 2	1,0 min	0,0 min	0,5 min	1,5 min	2,95 kW	Aus	Aus	Aus	An
Stand-by 3	1,0 min	0,0 min	2,0 min	3,0 min	0,20 kW	Aus	Aus	Aus	Aus

Abbildung A4: Abschaltstrategie einer Waschmaschine

Fräsprozess					Komponenten				
	t _{unterfahren}	t _{min.}	t _{hochfahren}	t _{standby}	Leistung	Servoachsen	Rückkühlanlage	Hydraulikpumpe	Maschinenkühlung
Arbeitend					6,10 kW	An	An	An	An
Betriebsbereit					5,10 kW	Gedrosselt	An	An	An
Stand-by 1	1,0 min	2,0 min	0,0 min	3,0 min	3,30 kW	Gedrosselt	An	An	An
Stand-by 2	2,0 min	5,0 min	1,0 min	8,0 min	0,40 kW	Aus	Aus	Aus	Aus

Abbildung A5: Abschaltstrategie einer Fräsmaschine

Drehprozess					Komponenten				
	t _{unterfahren}	t _{min.}	t _{hochfahren}	t _{standby}	Leistung	Servoachsen	Hydraulikpumpe	Kühlsystem	Transportband
Arbeitend					4,37 kW	An	An	An	An
Betriebsbereit					3,67 kW	Gedrosselt	An	An	An
Stand-by 1	1,0 min	4,0 min	1,0 min	6,0 min	3,00 kW	Gedrosselt	An	An	An
Stand-by 2	1,0 min	10,0 min	1,0 min	12,0 min	1,80 kW	Gedrosselt	Aus	An	An

Abbildung A6: Abschaltstrategie einer Drehmaschine

Honprozess					Komponenten				
	t _{unterfahren}	t _{min.}	t _{hochfahren}	t _{standby}	Leistung	Regelantriebe	Systemölpumpe	Honölpumpe	Kühlsystem
Arbeitend					15,60 kW	An	An	An	An
Betriebsbereit					6,70 kW	Gedrosselt	An	An	An
Stand-by 1	2,0 min	5,0 min	3,0 min	10,0 min	4,30 kW	Gedrosselt	An	An	An
Stand-by 2	5,0 min	10,0 min	20,0 min	35,0 min	2,50 kW	Gedrosselt	Aus	Aus	An
Stand-by 3	5,0 min	25,0 min	20,0 min	50,0 min	0,40 kW	Aus	Aus	Aus	Aus

Abbildung A7: Abschaltstrategie einer Drehmaschine

	Umformprozess				Leistung	Komponenten			
	t _{runterfahren}	t _{min.}	t _{hochfahren}	t _{Standby}		Hydraulikpumpe	KSS-Kühlung	KSS-Pumpe	Hydrauliknebenstr.
Arbeitend		-			37,30 kW	An	An	An	An
Betriebsbereit		-			20,40 kW	Gedrosselt	An	Aus	An
Stand-by 1					2,20 kW	Aus	An	Aus	Aus

Abbildung A8: Abschaltstrategie einer Drehmaschine

Ein in der Automobilproduktion bekanntes und weitgehend ungelöstes Problem sind hohe Energie- und Medienbedarfe der Maschinen- und Anlagentechnik in nicht wertschöpfenden Zeiten. Gerade oft und kurz auftretende ungeplante Unterbrechungen können aufgrund fehlender Informationen über das zeitliche Eintreten und die zeitliche Dauer der Pause nicht für einen Stand-by-Betrieb von der Maschinen- und Anlagentechnik genutzt werden.

Die Dissertation befasst sich mit der Entwicklung von Steuerungsalgorithmen für vollverkettete vollvernetzte Großserienfertigungen, welche die Maschinen- und Anlagentechnik dazu befähigt, in nicht wertschöpfenden Zeiten einen energetisch optimalen Betriebszustand einzunehmen. Ein entwickelter Stand-by-Manager, welcher als Produktionssteuerungssystem arbeitet und in Abhängigkeit der aktuellen Produktionssituation für jede Maschine eines Fertigungssystems prognostiziert wann ein Maschinenstillstand eintritt und wie lange dieser dauert, ermöglicht eine ausbringungsneutrale Überführung und Reaktivierung der Maschinen- und Anlagentechnik in einen Stand-by-Betrieb.

ISBN 978-3-7376-0208-2



9 783737 602082 >