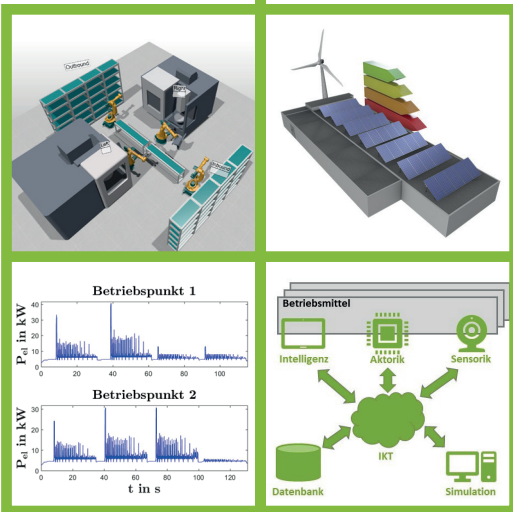


Matthias Meißner

Entwicklung eines Energieeffizienzzyklus für adaptive Produktionssysteme

Band 17



**Entwicklung eines Energieeffizienzzyklus
für adaptive Produktionssysteme**

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von

Matthias Meißner, M.Sc.

Dortmund, 2020

Referentin:	Prof. Dr.-Ing. Johanna Myrzik
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz
Prüferin:	Prof. Dr.-Ing. Petra Wiederkehr
Tag der mündlichen Prüfung:	07. Februar 2020

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz

Band 17

Matthias Meißner

**Entwicklung eines Energieeffizienzzyklus
für adaptive Produktionssysteme**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7273-0

ISSN 2567-2908

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Die Motivation zur Entwicklung des Energieeffizienzzyklus basiert auf gesellschaftlichen und politischen Forderungen, die Effizienz von Fabriken zu steigern, um die Energiewende zu unterstützen und Produktionskosten zu reduzieren. Aktuelle Konzepte und Methoden, wie das Energiemanagementsystem, nutzen nicht die neuen Möglichkeiten der vierten industriellen Revolution. Die Einführung von adaptiven Produktionssystemen ermöglicht exemplarisch die Nutzung von Sensorik, Aktorik und Kommunikation für neue Konzepte und Methoden. Ziel ist die Entwicklung eines Konzepts, welches diese technischen Möglichkeiten ausnutzt, um die Energieeffizienz von Produktionssystemen zu steigern.

Der Energieeffizienzzyklus besteht aus zwei zyklischen Prozessen, dem kontinuierlichen Wahrnehmungs- und Bewertungsprozess, sowie dem ereignisdiskreten Planungs- und Realisierungsprozess. Der Wahrnehmungsprozess überwacht den Effizienzstatus des Produktionssystems und identifiziert einen Anpassungsbedarf, falls die Flexibilität des Systems überschritten wird. Der dadurch ausgelöste Planungsprozess generiert mithilfe von Planungs- und Optimierungsmethoden mögliche Lösungen für den Anpassungsbedarf durch Nutzung von Simulationsmodellen und realisiert die beste Planungsvariante. Zur Bewertung der Effizienz wird ein innovatives Kennzahlensystem, bestehend aus Prozesszustands- und Prozessinterdependenzindikatoren, entwickelt. Das Kennzahlensystem ist fähig, die Effizienz eines Prozesses unter Berücksichtigung einer beliebigen Anzahl an Ein- und Ausgangsgrößen, sowie die Wechselwirkungen zwischen Prozessen zu repräsentieren. Die Planung von Lösungsmöglichkeiten konzentriert sich auf die Ausnutzung der Energieflexibilität durch Optimierungsalgorithmen in Form des Brute Force Algorithmus und des evolutionären Algorithmus Differential Evolution.

Zur Validierung des Effizienzzyklus werden zwei Simulationsmodelle von exemplarischen Produktionssystemen verwendet. Charakteristisch für das erste System ist seine hohe Energieflexibilität, welche durch zwei Bearbeitungszentren mit verschiedenen Betriebspunkten bereitgestellt wird. Das zweite System umfasst eine von Mitarbeitern betriebene Montagezelle zur Herstellung von Leuchten. Durch die Analysen wird bestätigt, dass die Prozesszustandsindikatoren fähig sind, alle betrachteten Einflüsse auf die Effizienz eines Prozesses qualitativ und quantitativ abzubilden. Die Prozessinterdependenzindikatoren sind nur für spezifische Anwendungsfälle geeignet. Beide Optimierungsalgorithmen sind in der Lage, den diskreten Zustandsraum von Produktionssystemen zu handhaben und liefern robuste Ergebnisse. Die Rechenzeit des Brute Force Ansatzes ist in Relation zum Differential Evolution länger. Die Echtzeitfähigkeit des Konzepts ist aufgrund der genutzten Modellierungs- und Optimierungstechniken noch nicht erreicht, woraus sich weiteres Forschungspotential ableitet, z. B. bezüglich künstlicher Intelligenzen zur Reduzierung der Rechenzeit.

Zusammenfassend stellt der Energieeffizienzzyklus für adaptive Produktionssysteme ein Konzept dar, welches die Möglichkeiten der industriellen Entwicklung ausnutzt, um die Energieeffizienz von Fabriken zu steigern. Eingesetzt werden kann der Effizienzzyklus sowohl in der Neu- und Anpassungsplanung von Fabriken, als auch in der Produktionsplanung.

Abstract

The motivation for developing the energy efficiency cycle bases on social and political requirements to increase the efficiency of factories. Among other things, the efficiency cycle is able to support the energy system transformation and reduce production costs. Actual concepts and methods, as energy management systems, do not use the new opportunities of the fourth industrial revolution. The establishment of adaptive production systems enables the use of sensors, actuators and communication for new concepts and methods. The objective is to design a concept, which exploits these technical opportunities to improve the energy efficiency of production systems.

The energy efficiency cycle includes two cyclical processes, the continuous perception and evaluation process and the event - discrete planning and realization process. The perception process monitors the efficiency status of the production system and identifies adaptation requirements, if the flexibility of the system is exhausted. The triggered planning process uses planning and optimization methods to generate possible solutions for the adaptation requirements and realizes the most energy - efficient solution. To evaluate the efficiency, an innovative key performance indicator system has been developed. It consists of the process status indicators and process interdependency indicators. The indicator system is able to represent the efficiency of a process with an arbitrary number of inputs and outputs. In addition, the interactions between processes can be visualized. The planning of possible solutions concentrates on the utilization of energy flexibility by optimization algorithms. Therefore, the Brute Force algorithm and the evolutionary algorithm Differential Evolution is implemented.

Two simulation models of exemplary production systems are used to validate the efficiency cycle. Characteristics of the first system is the high energy flexibility provided by two machining centers with several operating points. The second system consists of an employee - operated assembly cell for manufacturing luminaries. The analyses confirm that the process status indicators are capable of representing all considered influences on the efficiency of a process qualitatively and quantitatively. In contrast, the process interdependency indicators are only suitable for specific applications. Both implemented optimization algorithms are enabled to handle the discrete state space of production systems and yield robust results. The computing time of the Brute Force approach is longer in relation to the Differential Evolution. Due to the modeling and optimization techniques used, the real-time ability of the concept has not yet been achieved. This results in further research potential. Exemplary, the use of artificial intelligence approaches is of interest to reduce the computing time.

In conclusion, the energy efficiency cycle for adaptive production systems offers a concept that exploits the opportunities of the industrial revolution to increase the energy efficiency of factories. The efficiency cycle can be applied for new planning and adaptation planning of factories as well as for production planning.

Danksagung

Zu aller erst möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. - Ing. Johanna Myrzik bedanken, die mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Dissertation im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie³) der Technischen Universität Dortmund zu erstellen. Besonders betonen möchte ich die fach- und zeitintensive Betreuung, welche auch nach ihrem Wechsel zur Universität Bremen im März 2018 unbeirrt fortgesetzt wurde. Ebenso möchte ich mich für die Ko - Betreuung von Frau Prof. Dr. - Ing. Petra Wiederkehr bedanken, wodurch insbesondere die Interdisziplinarität meiner Arbeit geprägt wurde. Zudem geht mein Dank an Herrn Prof. Dr. - Ing. habil. Christian Rehtanz, der nach dem Universitätswechsel von Frau Prof. Dr. - Ing. Johanna Myrzik die organisatorische Betreuung sowie das Koreferat übernommen hat.

An dieser Stelle möchte ich darauf hinweisen, dass diese Arbeit im Rahmen des Graduiertenkollegs 2193 „Anpassungsintelligenz von Fabriken im dynamischen und komplexen Umfeld“ entstanden ist, welches durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird (Förderkennzeichen: 276879186). Hervorheben möchte ich die großartige Zusammenarbeit aller Doktorandinnen und Doktoranden innerhalb des Graduiertenkolleg. Besonderer Dank meinerseits geht an Herrn Dr. - Ing. Andreas Wirtz vom Institut für Spanende Fertigung und Herrn Tim Delbrügger vom RIF Institut für Forschung und Transfer e.V. für die hervorragende interdisziplinäre Zusammenarbeit und die daraus entstanden wissenschaftlichen Publikationen. Neben den Mitgliedern des Graduiertenkollegs möchte ich mich auch bei allen Kolleginnen und Kollegen des ie³ für die tolle Atmosphäre bedanken, die ein entspanntes, kreatives und fachlich intensives Arbeiten ermöglicht hat.

Ebenso möchte ich mich bei meinen studentischen Abschlussarbeiterinnen und Abschlussarbeitern, sowie bei meinen beiden wissenschaftlichen Hilfskräften Frau Lynn Massalski und Frau Naomi Catleen Straka für ihre tatkräftige Unterstützung bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei dem Unternehmen *Trilux GmbH & Co. KG* aus Arnsberg bedanken, welches es mir ermöglicht hat, eine praktische Validierung meiner Ergebnisse vorzunehmen. Insbesondere geht mein Dank an Herrn Frank Decker und Herrn Sven Bruhn für die Organisation und Betreuung während der Messwerterhebung.

Dortmund, Februar 2020

Matthias Meißner

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

AE	Assembly Electronics (Prozess des industriellen Anwendungsbeispiels)
AGV	Fahrerloses Transportfahrzeug (engl.: automated guided vehicle)
AMV	Abstraktion durch einen arithmetischen Mittelwert (engl.: abstraction by an arithmetic mean value)
AL	Assembly Lamp (Prozess des industriellen Anwendungsbeispiels)
AO	Assembly Optics (Prozess des industriellen Anwendungsbeispiels)
APF	Abstraktion durch eine Polynomfunktion (engl.: abstraction by a polynomial function)
ARF	Abstraktion durch eine Rampenfunktion (engl.: abstraction by a ramp function)
AW	Automatic Wiring (Prozess des industriellen Anwendungsbeispiels)
betriebl.	betriebliche
CAD	Druckluftverteilung (engl.: compressed air distribution)
CAG	Druckluftherzeugung (engl.: compressed air generation)
CAP	Druckluftaufbereitung (engl.: compressed air preparation)
CEPI	Combined Energy Performance Indicator
CPI	Combined Performance Indicator
CPS	Cyber - physische Systeme
CPPI	Combined Power Performance Indicator
DE	Differential Evolution
EDMS	Energiedatenmanagementsystem
EI	Energieintensität
EnMS	Energiemanagementsystem
EPI	Energy Performance Indicator
ERP	Enterprise - Resource - Planning
elektr.	elektrisch
FA	Final Assembly (Prozess des industriellen Anwendungsbeispiels)
FIFO	First In - First Out
GEPI	Grade Energy Performance Indicator
GEPID	Grade Energy Performance Indicator Deviation
GEPIR	Grade Energy Performance Indicator Ratio
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistung
GPI	Grade Performance Indicator
GPID	Grade Performance Indicator Deviation
GPIR	Grade Performance Indicator Ratio
GPPI	Grade Power Performance Indicator
GPPID	Grade Power Performance Indicator Deviation

GPPIR	Grade Power Performance Indicator Ratio
HLS	High Level Structure
Ho	Übergeben (engl.: hand over)
IoT	Internet der Dinge (engl.: internet of things)
IS	Eingangslager (engl.: input storage)
kalkulator.	kalkulatorisch
KSS	Kühlschmierstoff
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
L	Loading (Prozess des industriellen Anwendungsbeispiels)
LED	Leuchtdiode (engl.: light - emitting diode)
MD	Messdaten
mech.	mechanisch
MHR	Machinenstundensatz (eng.: machine hour rate)
MM	Fräsmaschine (eng.: milling machine)
NAPE	Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz
OS	Betriebszustand (engl.: operating state)
OP	Betriebspunkt (engl.: operating point)
OW	Fabriktausgangslager (eng.: outgoing warehouse)
P	Packaging (Prozess des industriellen Anwendungsbeispiels)
PDCA	Plan - Do - Check - Act
phys.	physikalisch
PI	Performance Indicator
PII	Prozessinterdenpendenzindikatoren (engl.: process interdependency indicators)
PPI	Power Performance Indicator
PSI	Prozesszustandsindikatoren (engl.: process status indicators)
S	Storing (Prozess des industriellen Anwendungsbeispiels)
SAM	Simulationsmodell basierend auf arithmetischen Mittelwerten
SEC	Spezifischer Energieverbrauch (engl.: specific energy consumption)
SD	Simulationsdaten
SGEPI	Sum Grade Energy Performance Indicator
SGPI	Sum Grade Performance Indicator
SGPPI	Sum Grade Power Performance Incicator
SSM	Simulationsmodell basierend auf Simulations- und Messdaten
St	Speichern (engl.: storing)
techn.	technisch
Tf	Transformieren (eng.: transform)
therm.	thermisch
Tp	Transportieren (eng.: transport)
Unl	Unloading (Prozess des industriellen Anwendungsbeispiels)
TCVCQ	zeitkontinuierliche und wertkontinuierliche Größen (engl.: time continuous and value continuous quantities)

TCVDQ zeitkontinuierliche aber wertdiskrete Größen (engl.: time continuous but
value diskrete quantities)

Formelzeichen

a	Zustellung
A	Untere Intervallgrenze der Dreiecksverteilung
b	Bewertungsfaktor
B	Obere Intervallgrenze der Dreiecksverteilung
C_R	Kreuzungskonstante
d	Durchmesser
E	Energie
$f(t)$	Mathematische Funktion in Abhängigkeit der Zeit
F_{VIR}	Zielwert einer Optimierung (engl.: value to reach)
F_{Weight}	Gewichtungsfaktor der Mutation
g	Generation
h	Leuchtenvariante
I	Stromstärke
In	Eingangsgröße eines Prozesses oder Systems (engl.: input)
l	Länge
LB	Untere Grenze einer Menge an Betriebszuständen (engl.: lower bound)
LV	Leuchtenvariante
m	Gesamt Anzahl an Prozessausgängen eines einzelnen Prozesses
M	Wahrscheinlichster Wert einer Dreiecksverteilung
\dot{m}	Massestrom
n	Gesamt Anzahl an Prozesseingängen eines einzelnen Prozesses
N_P	Populationsgröße
o	Gesamt Anzahl an Prozessen eines Produktionssystems
Out	Ausgangsgröße eines Prozesses oder Systems (engl.: output)
p	Druck
P	Leistung
q	wertdiskrete Stückzahl
Q	wertkontinuierliche Stückzahl
r_{OS}	Anzahl an Betriebszuständen für ein Produktionssystem
R_{DE}	Robustheit des Differential Evolution
t	Zeit
T	Zeitperiode
u	Element eines Konkurrenzvektors
U	Spannung
\vec{U}	Konkurrenzvektor (engl.: trial vector)
UB	Obere Grenze einer Menge an Betriebszuständen (engl.: upper bound)
v	Element eines Mutationsvektors
\vec{V}	Mutationsvektor (engl.: mutation vector)
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom

x	Element eines Zustandsvektors
\vec{X}	Zustandsvektor (engl.: target vector, auch Elternvektor genannt)
Z	Menge an Betriebspunkten eines Prozesses
Θ	Skalierungsparameter (für Weibull- und Gammaverteilung)
Λ	Formparameter (für Weibull- und Gammaverteilung)
η	Wirkungsgrad
λ	Rohrreibungskoeffizient
ρ	Dichte
τ	Temperatur
v	Geschwindigkeit
χ	Fehlerstatus
ω	Spindeldrehzahl eines Bearbeitungszentrums

Indizes

a	Nummerierung eines Eltern-, Mutations- oder Konkurrenzvektors
AA	Umgebungsluft (engl.: ambient air)
b	Nummerierung der Elemente eines Eltern-, Mutations- oder Konkurrenzvektors
c	Laufvariable für Phasenstromstärken, Phasenspannungen und Phasenleistungen
C	Förderband (engl.: conveyor)
CA	Druckluft (engl.: compressed air)
CAS	Druckluftsystem (engl.: compressed air system)
Com	Kompressor (engl.: compressor)
D	Kältetrockner (engl.: dryer)
Delay	Verzögerungszeit (engl.: delay time)
e	Breite für die Zustellung
el	elektrisch
F	Filter (engl.: filter)
g	Generation
ges	gesamt
h	Leuchtenvariante
i	Laufvariable von Prozesseingangsgrößen
I	Leerlauf (engl.: idle)
In	Eingangsgröße eines Prozesses oder Systems (engl.: input)
Init	Initialisierungsvektor
IR	Eingangslagerroboter (engl.: inbound robot)
j	Laufvariable von Prozessausgangsgrößen
k	Laufvariable von Produktionsprozessen
L	Phasenstromstärke
Load	Lastgröße (engl.: load)
MM	Fräsmaschine (engl.: milling machine)
N	Neutralleiter
Out	Ausgangsgröße eines Prozesses oder Systems (engl.: output)
OR	Ausgangslagerroboter (engl.: outbound robot)
p	Tiefe für die Zustellung
P	Rohrleitung (engl.: pipeline)
PL	Produktionslinie
PP	Produktionsprozess
PR	Produktionsroboter (engl.: production robot)
Pro	Bearbeitung (engl.: processing)
PS	Produktionssystem
Repair	Reparaturzeit (engl.: repair time)
Res	Druckluftreservoir (engl.: compressed air reservoir)

RiF	Druckluftreservoir ist gefüllt (engl.: reservoir is filled)
Sim	Simulation
SF	Ansaugfilter (engl.: suction filter)
Str	Strangspannung
th	thermisch
W	Weibull
WH	Abwärme (engl.: waste heat)
WT	Arbeitszeit (engl.: working time)
α	Erste zufällig Auswahl eines Zustandsvektors zur Erzeugung von Mutationsvektoren
β	Zweite zufällig Auswahl eines Zustandsvektors zur Erzeugung von Mutationsvektoren
γ	Dritte zufällig Auswahl eines Zustandsvektors zur Erzeugung von Mutationsvektoren
Γ	Gammaverteilung
δ	Vierte zufällig Auswahl eines Zustandsvektors zur Erzeugung von Konkurrenzvektoren
Δ	Dreiecksverteilung

Abbildungsverzeichnis

1.1	Gliederung der Arbeit	7
2.1	Darstellung des Fabriksystems als soziotechnisches System mit den drei Elementen <i>technische Betriebsmittel, menschliche Faktoren</i> und <i>Organisation</i>	10
2.2	Aufbau eines Fabriksystems mit dem Fokus auf die fertigende Produktion	11
2.3	Darstellung der hierarchischen Ordnung von Produktionssystemen	12
2.4	Darstellung der peripheren Ordnung von Produktionssystemen mit beispielhaften Prozessen	13
2.5	Grundlegender Aufbau eines Systems mit seinen Elementen und Relationen im Sinne der systemtheoretischen Betrachtung von Produktionssystemen	14
2.6	Schematische Darstellung des Prozesskettenparadigmas zur Beschreibung von Produktionssystemen	18
2.7	Dortmunder Prozesskettenmodell zur Beschreibung von Produktionsprozessen	19
2.8	Charakteristiken von adaptiven Produktionssystemen und deren Relationen untereinander	22
2.9	Klassischer, linearer Fabrikplanungsprozess mit Darstellung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems	26
2.10	Intelligenter Anpassungsprozess für Fabriken im dynamischen und komplexen Umfeld	27
2.11	Netzdiagramm des intelligenten Anpassungsprozesses zur Verdeutlichung der vielfältigen und oftmals konkurrierenden Kenngrößen	29
2.12	Entscheidungsbaum zur Auswahl von stochastischen Verteilungsfunktionen	31
2.13	Dichte- und Verteilungsfunktion der Dreiecksverteilung für verschiedene Erwartungswerte und Intervallgrenzen	32
2.14	Dichte- und Verteilungsfunktion der Weibullverteilung für verschiedene Skalierungsparameter und Formparameter	33
2.15	Dichte- und Verteilungsfunktion der Gammaverteilung für verschiedene Skalierungsparameter und Formparameter	34
3.1	Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen der Sektoren Industrie, GHD, private Haushalte und Verkehr der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2016	35
3.2	Aspekte der Energieeffizienz für Produktionssysteme	37
3.3	Struktur des Energiemanagementsystems nach der DIN EN ISO 50001	48
3.4	Energiemanagement- und Energiedatenmanagementsystem	48

3.5	Elektr. Leistungsbedarf von sechs Betriebspunkten einer Fräsmaschine zur Herstellung eines Erzeugnisses zur Verdeutlichung der Energieflexibilität von Betriebsmitteln	52
4.1	Darstellung des Energieeffizienzzyklus auf Basis der Anpassungsintelligenz von Fabriken im dynamischen und komplexem Umfeld	57
4.2	Übersicht der drei Prozesszustandsindikatoren zur Repräsentation der Energieeffizienz von Produktionsprozessen (PP_k)	62
4.3	Schematische Übersicht über die Prozessinterdependenzen zwischen zwei Prozessen bezüglich deren Energieeffizienzwechselwirkungen	68
4.4	Schematische Darstellung der quadratischen Effizienzmatrix eines Produktionssystems zur Beschreibung der Prozessinterdependenzen	69
4.5	Gegenüberstellung der zeitkontinuierlichen aber wertdiskreten bzw. der zeit- und wertkontinuierlichen Prozessbetrachtung in Bezug auf die Prozessein- und Prozessausgangsgrößen	72
4.6	Schematische Darstellung einer Stabilitätskarte für Fräsprozesse zur Verdeutlichung der systemischen und betrieblichen Freiheitsgrade von Betriebsmitteln	76
4.7	Darstellung des Nummerierungsproblem von diskreten Betriebspunkten in Relation zum kontinuierlichen Zustandsraum	76
4.8	Schematisches Beispielproduktionssystem zur Darstellung des betrieblichen bzw. diskreten Zustandsraums von Produktionssystemen	77
4.9	Funktionsweise des Differential Evolution	80
4.10	Einbindung des Energieeffizienzzyklus in das Energiemanagementsystem	88
5.1	Grundlegende Modellierungsstruktur für die Darstellung von Produktionsprozessen in <i>Matlab/Simulink</i> und dessen Toolbox <i>SimEvents</i>	94
5.2	Zustandsgraph eines Prozesses zur Modellierung der Betriebspunkte und deren Eigenschaften, wie z. B. dem elektr. Energiebedarf	96
5.3	Elektr. Leistungsprofil einer Fräsmaschine basierend auf den Ergebnissen einer geometrisch - physikalische Zerspansimulation	98
5.4	Vergleich zwischen Messwerten und drei Abstraktionsmethoden für Leistungsprofile am Beispiel der elektr. Leistungsaufnahme einer Fräsmaschine während der Bearbeitung von Baustahl	99
5.5	Dreidimensionale Darstellung der Produktionslinie des Anwendungsbeispiels zur Analyse des Energieeffizienzzyklus	101
5.6	Dreidimensionale Darstellung des Erzeugnisses der Produktionslinie	102
5.7	Elektr. Leistungsprofil des ersten Bearbeitungszentrums MM_1 für dessen ersten Betriebspunkt $OP_{MM_1} = 1$	103
5.8	Elektr. Leistungsprofil des Roboters <i>IbR</i> für das Übergeben des Eingangsmaterials zwischen dem Eingangslager <i>IbS</i> und dem ersten Förderband C_1	103
5.9	Erweitertes Produktionssystem zur Analyse des Energieeffizienzzyklus basierend auf der Produktionslinie aus [MM3]	105

5.10	Messtechnisch ermittelter Druckluftbedarf der beiden Bearbeitungszentren MM_1 und MM_2 (KSS: Kühlschmierstoff)	106
5.11	Darstellung der Prozesskette des Anwendungsbeispiels durch das Dortmunder Prozesskettenmodell unter Berücksichtigung der ökonomischen Wertsteigerung der Prozesse der Produktionslinie	110
5.12	Repräsentation des Prozesses <i>Generating Compressed Air (GCA)</i> auf der Hierarchieebene <i>Fertigungsgruppen</i> durch das Dortmunder Prozesskettenmodell	111
5.13	Repräsentation des Prozesses <i>Transform 1 (Tf1)</i> auf der Hierarchieebene <i>Fertigungsplätze</i> durch das Dortmunder Prozesskettenmodell	111
5.14	Darstellung der modellierten Produktionslinie des Anwendungsbeispiels zur Analyse des Energieeffizienzzyklus	113
5.15	Zustandsgraph des ersten Bearbeitungszentrums MM_1 zur Modellierung dessen Betriebspunkte und deren Eigenschaften	114
5.16	Darstellung des Druckluftsystems zur Erzeugung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung von Druckluft	115
5.17	Oberste Modellebene des implementierten Druckluftmodells	116
5.18	Struktur der Kalkulationen zur Modellierung des Verhaltens des Druckluftreservoirs	119
5.19	Ablaufdiagramm zur Bestimmung der Bearbeitungszeit, dem Ausfallzeitpunkt und der Reparaturzeit für ein Bearbeitungszentrum zur Modellierung von stochastischen Einflüssen	122
5.20	Zusammenhänge der zeitlichen Prozessparameter eines Bearbeitungszentrums bezüglich schwankender Bearbeitungszeiten, zufälligen Maschinenausfällen und Reparaturzeiten	124
6.1	Zusammenfassende Darstellung aller zeit- und wertkontinuierlichen Indikatoren des innovativen Kennzahlensystemes, welches in Kapitel 4.2 definiert wurde	126
6.2	Darstellung der phys. Ein- und Ausgangsgrößen für den Prozess $Tf2$ im Betriebszustand 1.1 für das Simulationsmodell SSM	128
6.3	Zeitkontinuierliche Darstellung der Prozesszustandsindikatoren des Prozesses $Tf2$ und des Betriebszustands 1.1 für das Simulationsmodell SSM	129
6.4	Separate Betrachtung der Kennzahl $EPI_{Tf2, E_{et}, Q_{out}}$ im Einschwingungszeitraum von 0 bis 1000 s und im eingependelten Zustand von 26000 bis 27000 s für das Simulationsmodell SSM im Betriebszustand 1.1	130
6.5	Resultierende GEPI- Werte des Prozesses $Tf2$ auf der Hierarchieebene <i>Fertigungsplätze</i> für das Simulationsmodell SSM bezüglich aller 144 Betriebszustände (engl.: operating states) und Vergrößerung für die erste 12 Betriebszustände, in denen die erste Fräsmaschine den Betriebspunkt $OP_{MM_1} = 1$ einnimmt, während die zweite Fräsmaschine ihre 12 Betriebspunkte durchläuft	131
6.6	Gegenüberstellung der phys. Ein- und Ausgangsgrößen des Prozesses PW auf der Hierarchieebene <i>Fertigungsplatzgruppen</i> mit Darstellung der Pareto - Front	132
6.7	Resultierende GEPI- Werte für die Prozesse PW und GCA auf der Hierarchieebene <i>Fertigungsplätze</i> für das Simulationsmodell SSM	133

6.8	Resultierende GEPI - Werte für den Prozess <i>FP</i> auf der Hierarchieebene <i>Produktionsbereiche</i> für das Simulationsmodell SSM	134
6.9	Spezifischer Energiebedarf <i>SEC</i> auf der Hierarchieebene <i>Produktionsbereiche</i> für das Simulationsmodell SSM	134
6.10	Verläufe der GEPIRs zwischen den drei Prozessen <i>L2</i> , <i>Tj2</i> und <i>Unl2</i> für das Simulationsmodell SSM im Betriebszustand 1.1	136
6.11	Resultierende SGEPI - Werte für den Prozess <i>FP</i> auf der Hierarchieebene <i>Produktionsbereiche</i> für das Simulationsmodell SSM	138
6.12	Gegenüberstellung der Energieeffizienz für den Prozess <i>FP</i> mit konstanten und schwankenden Bearbeitungszeiten der beiden Fräsmaschinen für das Simulationsmodell SAM. Für die schwankenden Bearbeitungszeiten wird eine Dreiecksverteilung mit einer Schwankung von $\pm 10\%$ für alle Betriebspunkte angenommen.	139
6.13	Gegenüberstellung der Energieeffizienz für den Prozess <i>FP</i> mit konstanten und schwankenden Bearbeitungszeiten der beiden Bearbeitungszentren für das Simulationsmodell SAM. Für die Bearbeitungszeiten wird eine Dreiecksverteilung verwendet, wobei jeder Betriebspunkt über eine individuelle Verteilung verfügt, welche in Tabelle B.3 aufgelistet sind.	140
6.14	Gegenüberstellung der Energieeffizienz des Prozesses <i>FP</i> ohne und mit Berücksichtigung von zufällig, auftretenden Betriebsmittelausfällen für das Simulationsmodell SAM	141
6.15	Auswertung der Robustheit des Differential Evolution für die Parametrierung $C_R = 0,25$ und $F_{\text{Weight}} = 0$ bei Populationsgrößen von $N_P = \{5; 10\}$	144
6.16	Auswertung der Robustheit des Differential Evolution für die Parametrierung $C_R = 0,75$ und $F_{\text{Weight}} = 2$ bei Populationsgrößen von $N_P = \{5; 10\}$	144
6.17	Gegenüberstellung der GEPIs der einzelnen Betriebszustände für die Produktionslinie und das Druckluftsystem bezüglich der Regelstrategien zur Erzeugung von Druckluft	148
6.18	Gegenüberstellung der GEPIs der einzelnen Betriebszustände für das Produktionssystem bezüglich der Regelstrategien zur Erzeugung von Druckluft	149
6.19	Darstellung der Planungsvariante fahrerloses Transportfahrzeug als a) schematisches Produktionssystem und b) der dazugehörigen Prozesskette	150
6.20	Modelliertes, elektr. Leistungsprofil des fahrerlosen Transportfahrzeugs, unter Berücksichtigung der verschiedenen Bewegungsbausteine für eine translatorische Geschwindigkeit von $v_{AGV} = 1,5$ m/s, einer rotatorische Geschwindigkeit von $\omega_{AGV} = 3$ rad/s und einer Zuladung von $m_{AGV,L} = 33,6$ kg	151
6.21	Vergleich der GEPIs der Prozesse <i>PW</i> und <i>GCA</i> für das originale Produktionssystem und der Planungsvariante bezüglich des Einsatzes eines fahrerlosen Transportfahrzeugs	152
6.22	Vergleich der GEPIs des Prozesses <i>FP</i> für das originale Produktionssystem und der Planungsvariante bezüglich des Einsatzes eines fahrerlosen Transportfahrzeugs	152

7.1	Fotografie der Montagezelle <i>AC</i> zur Montage von Leuchten (mit Dank an das Unternehmen <i>Trilux</i>)	160
7.2	Schematische Darstellung des Aufbaus und Materialflusses der Montagezelle <i>AC</i> zur Montage von Leuchten	160
7.3	Fotografie einer der montierten Leuchtenvarianten (mit Dank an das Unternehmen <i>Trilux</i>)	161
7.4	Prozesskette für die Montage der Leuchten unter Berücksichtigung der prozentualen Wertsteigerung der individuellen Prozesse	162
7.5	Fotografie des Roboterarms der <i>RC</i> zur automatisierten Verdrahtung bzw. zur Durchführung des Prozesses <i>AW</i> (mit Dank an das Unternehmen <i>Trilux</i>)	162
7.6	Messwerte der drei Phasenströme für den Messzeitraum von einer Arbeitswoche	165
7.7	Kalkulierter Wirkleistungsbedarf während des Messzeitraums von einer Arbeitswoche	166
7.8	Exemplarisches, kalkuliertes Leistungsprofil und die dazugehörigen, gemessenen Phasenströme der Montagezelle <i>AC</i> während der Ausführung des Prozesses <i>AW</i> von Leuchte 1	166
7.9	Durchschnittliches Leistungsprofil der Montagezelle <i>AC</i> für den Prozess <i>AW</i> zur automatischen Verdrahtung von Leuchte 1	167
7.10	Darstellung der Erweiterung des Modellierungskonzepts zur Einbindung von Mitarbeitern durch den Funktionsblock <i>Resource Pool</i> am Beispiel des Prozesses <i>AO</i>	168
7.11	Schematische Darstellung des implementierten Simulationsmodells der Prozesskette der Montagezelle <i>AC</i>	169
7.12	Ergebnisse für den GEPI des Prozesses <i>AL</i> auf der höchsten Hierarchieebene <i>Fertigungs-/Montageplatzgruppe</i> für die Montagezelle <i>AC</i>	172
7.13	Ergebnisse für den GEPI des Prozesses <i>AL</i> für die Verdopplung des Mitarbeiterstundenlohns in Relation zum ursprünglichen Stundenlohn auf der Hierarchieebene <i>Fertigungs-/Montageplatzgruppe</i>	172
7.14	Ergebnisse für den GEPI des Prozesses <i>AL</i> für die auf 20 % reduzierte Wertsteigerung der Transformationsprozesse auf der Hierarchieebene <i>Fertigungs-/Montageplatzgruppe</i>	173
A.1	Elektr. Leistungsprofile für das erste Bearbeitungszentrum MM_1 und dessen sechs Betriebspunkte (engl.: operating points, OP) basierend auf einer geometrisch - physikalischen Zerspansimulation	197
A.2	Elektr. Leistungsprofile für das erste Bearbeitungszentrum MM_2 und dessen sechs Betriebspunkte (engl.: operating points, OP) basierend auf einer geometrisch - physikalischen Zerspansimulation	198
A.3	Elektr. Leistungsprofile für die vier Roboter bezüglich der Übergabeprozesse basierend auf einer dynamischen Robotersimulation	198
B.1	Messaufbau zur Erfassung der elektr. Leistungsaufnahme eines fahrerlosen Transportfahrzeugs vom Typ <i>RBI Base</i> des Unternehmens <i>Robotnik</i>	210

C.1	Fotografie des ersten Teils der Arbeitsstation <i>WSAO</i> für die Vormontage der Optik bzw. des Prozesses <i>AO</i> (Einfügen der LED-Streifen in das Gehäuse, welches die Optik beinhaltet)	211
C.2	Fotografie des zweiten Teils der Arbeitsstation <i>WSAO</i> für die Vormontage der Optik bzw. des Prozesses <i>AO</i> (Reinigen mithilfe von Druckluft und verschrauben der Komponenten)	211
C.3	Fotografie der Arbeitsstation <i>WSAE</i> für die Vormontage des Rahmens bzw. des Prozesses <i>AE</i> (Montage der elektronischen Komponenten, wie der Steuerung und dem Vorschaltgerät)	212
C.4	Fotografie der Arbeitsstation <i>WSFA</i> für den Funktionstest und die Endmontage bzw. des Prozesses <i>FA</i>	212
C.5	Fotografie der Arbeitsstation <i>WSP</i> für die Verpackung der fertig montierten Leuchte bzw. des Prozesses <i>P</i>	213
C.6	Fotografie des Schaltschranks, welcher alle Arbeitsstationen der Montagezelle <i>AC</i> mit elektr. Leistung versorgt	213
C.7	Fotografie des verwendeten Messgerätes zur Erfassung der elektr. Stromstärke: <i>FLUKE 435^{Series II} Power Quality and Energy Analyzer</i>	214
C.8	Fotografie der verwendeten Stromzangen zur Erfassung der elektr. Stromstärke: <i>FLUKE i 200s</i>	214
C.9	Messaufbau zur Erfassung der aufgenommenen, elektr. Stromstärke der Montagezelle <i>AC</i>	215
C.10	Darstellung der Messwerte der elektr. Stromstärke und der kalkulierten, elektr. Leistungsaufnahme der Montagezelle <i>AC</i> im Zeitraum vom 17.09.2018, 08:47:04.330 Uhr bis zum 17.09.2018, 12:34:03.330 Uhr	216
C.11	Darstellung der Messwerte der elektr. Stromstärke und der kalkulierten, elektr. Leistungsaufnahme der Montagezelle <i>AC</i> im Zeitraum vom 17.09.2018, 13:44:12.295 Uhr bis zum 18.09.2018, 09:01:42.045 Uhr	216
C.12	Darstellung der Messwerte der elektr. Stromstärke und der kalkulierten, elektr. Leistungsaufnahme der Montagezelle <i>AC</i> im Zeitraum vom 18.09.2018, 09:30:11.514 Uhr bis zum 19.09.2018, 08:52:37.014 Uhr	217
C.13	Darstellung der Messwerte der elektr. Stromstärke und der kalkulierten, elektr. Leistungsaufnahme der Montagezelle <i>AC</i> im Zeitraum vom 19.09.2018, 09:27:56.541 Uhr bis zum 20.09.2018, 09:00:12.541 Uhr	217
C.14	Darstellung der Messwerte der elektr. Stromstärke und der kalkulierten, elektr. Leistungsaufnahme der Montagezelle <i>AC</i> im Zeitraum vom 20.09.2018, 09:35:58.139 Uhr bis zum 21.09.2018, 09:00:51.889 Uhr	218
C.15	Darstellung der gemittelten, elektr. Leistungsprofile $P_{AC,el,Mean,Lamp,h}$ der unterschiedlichen Leuchtenvarianten <i>h</i>	219

Tabellenverzeichnis

2.1	Potentialklassen des Dortmunder Prozesskettenmodells	20
5.1	Techn. Eigenschaften der Betriebsmittel für das Anwendungsbeispiel zur Analyse des Energieeffizienzzyklus	107
5.2	Betriebspunkte der beiden Bearbeitungszentren des Anwendungsbeispiels für die Analyse des Energieeffizienzzyklus	108
6.1	Übersicht über die Ein-, Ausgangsgrößen und Prozesszustandsindikatoren für den Prozess <i>Ty2</i> am Ende des Simulationszeitraums für den Betriebszustand 1.1	128
7.1	Bearbeitungszeiten der einzelnen Prozesse der Montagezelle <i>AC</i> unter Berücksichtigung der verschiedenen Leuchtenvarianten	163
A.1	Bearbeitungszeiten und elektr. Leistung- bzw. Energieaufnahmen der Produktionsprozesse in Abhängigkeit der Betriebsmittel und Betriebspunkte für die beiden Simulationsmodelle <i>SSM</i> und <i>SAM</i>	199
A.2	Bestimmung der Maschinenstundensätze für die Betriebsmittel des Produktionssystems	200
A.3	Auflistung aller Quellen, Senken und Prozesszustandsindikatoren des fiktiven Produktionssystems	201
A.4	Referenzwerte des Combined Energy Performance Indicator für die einzelnen Prozesse in Abhängigkeit der Modellierungsmethode	203
B.1	Effizienzmatrix für das Anwendungsbeispiel im Betriebszustand 1.1 unter Verwendung der direkt Interdependenzkennzahl <i>GEPIR</i>	206
B.2	Effizienzmatrix für das Anwendungsbeispiel im Betriebszustand 2.1 unter Verwendung der direkt Interdependenzkennzahl <i>GEPIR</i>	207
B.3	Parameter der Dreiecksverteilung zur Abbildung von individuellen, schwankenden Bearbeitungszeiten für jeden Betriebspunkt der beiden Bearbeitungszentren des Anwendungsbeispiel, wobei die untere und obere Intervallgrenzen als Prozentangabe bezüglich des Erwartungswerts angegeben werden	208
B.4	Techn. Spezifikationen der Workstation zur Durchführung der Simulationen	209
B.5	Parametrierungsergebnisse für den Differential Evolution bezüglich der Robustheit und durchschnittlichen Rechenzeit für das Simulationsmodell <i>SAM</i>	209
B.6	Techn. Charakteristiken des Roboters <i>RBI Base</i> , der als fahrerloses Transportfahrzeug eingesetzt wird	210
C.1	Übersicht über die montierten Leuchtenvarianten <i>h</i> innerhalb des Messzeitraums vom 17.09.2018 bis zum 21.09.2018	218

C.2	Simulationsergebnisse für eine variierende Mitarbeiteranzahl, die Leuchtenvariante $h = 1$, den Prozess <i>AL</i> , einer Wertsteigerung von 100 % für Transformationsprozesse und einen Stundenlohn von 27,37 €/h pro Mitarbeiter	220
C.3	Simulationsergebnisse für eine variierende Mitarbeiteranzahl, die Leuchtenvariante $h = 1$, den Prozess <i>AL</i> , einer Wertsteigerung von 100 % für Transformationsprozesse und einem Stundenlohn von 54,74 €/h pro Mitarbeiter	220
C.4	Simulationsergebnisse für eine variierende Mitarbeiteranzahl, die Leuchtenvariante $h = 1$, den Prozess <i>AL</i> , einer Wertsteigerung von 20 % für Transformationsprozesse und einen Stundenlohn von 27,37 €/h pro Mitarbeiter	220

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung/Abstract	III
Danksagung	V
Abkürzungs-/Abbildungs-/Tabellenverzeichnis	VII
Inhaltsverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Ziele der Arbeit	3
1.2 Gliederung der Arbeit	6
2 Fabrikssysteme	9
2.1 Fabrikaufbau und Fabrikstrukturen	10
2.2 Systemtheoretische Betrachtung	14
2.3 Prozesskettenparadigma	17
2.4 Adaptive Produktionssysteme	22
2.5 Anpassungsintelligenz von Fabriken	25
2.6 Stochastische Einflüsse	30
3 Energieeffizienz in der Produktion	35
3.1 Energieeffizienz	36
3.2 Energieeffizienzkennzahlen	40
3.2.1 Konzeption von Kennzahlen	41
3.2.2 Industrielle, energiebezogene Kennzahlen	43
3.3 Energiemanagementsysteme	47
3.4 Energieflexibilität von Produktionssystemen	51
4 Energieeffizienzzyklus für adaptive Produktionssysteme	55
4.1 Konzept des Energieeffizienzzyklus	56
4.2 Innovatives Kennzahlensystem	61
4.2.1 Prozesszustandsindikatoren	61
4.2.2 Prozessinterdependenzindikatoren	67
4.2.3 Zeit- und werthorizont des Kennzahlensystems	72
4.3 Optimierung von Produktionssystemen	74
4.3.1 Zustandsraum von Produktionssystemen	75

4.3.2	Brute Force Optimierung	79
4.3.3	Differential Evolution Optimierung	79
4.4	Einbindung in das Energiemanagementsystem	87
5	Modellbildung und Anwendungsbeispiel	91
5.1	Grundlagen der Modellbildung	92
5.2	Grundlegende Modellierungsstruktur für Produktionsprozesse	94
5.3	Exemplarisches Produktionssystem	101
5.3.1	Darstellung durch das Dortmunder Prozesskettenmodell	109
5.3.2	Implementierung der Produktionslinie	112
5.3.3	Implementierung des Druckluftsystems	115
5.3.4	Bestimmung und Implementierung der Referenzwerte	120
5.3.5	Implementierung von stochastischen Einflussparametern	121
6	Validierung des Energieeffizienzzyklus	125
6.1	Validierung des Kennzahlensystems	127
6.1.1	Verhalten der Prozesszustandsindikatoren	127
6.1.2	Verhalten der Prozessinterdependenzindikatoren	135
6.1.3	Analyse von stochastischen Einflüssen	138
6.2	Validierung der Optimierung	142
6.2.1	Brute Force Optimierung	142
6.2.2	Differential Evolution Optimierung	143
6.3	Validierung durch Planungsvarianten	146
6.3.1	Drehzahleregelter Kompressor zur Druckluftherzeugung	146
6.3.2	Fahrerloses Transportfahrzeug zur Materialbereitstellung	149
6.4	Diskussion der Validierung	154
7	Praxisbeispiel zur Validierung	159
7.1	Aufbau und Messwerte der Montagezelle	160
7.2	Implementierung der Montagezelle	168
7.3	Validierung der Prozesszustandsindikatoren	171
8	Fazit und Ausblick	175
	Literaturverzeichnis	181
	Wissenschaftliche Publikationen	194
A	Ergänzende Informationen zum Anwendungsbeispiel	197
B	Ergänzende Informationen zur Validierung	205
C	Ergänzende Informationen zur Montagezelle	211
D	Lebenslauf	221