

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

HOLGER HAAG

Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion



Universität Stuttgart



Fraunhofer

IPA

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Prof. Dr.-Ing. Prof. Dr. h. c. mult. Alexander Verl

Prof. Dr.-Ing. Prof. e. h. Dr.-Ing. e. h. Dr. h. c. mult. Engelbert Westkämper

Holger Haag

**Eine Methodik zur modellbasierten Planung
und Bewertung der Energieeffizienz in der
Produktion**

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-00, Telefax 0711 970-1399
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Prof. Dr.-Ing. Prof. Dr. h. c. mult. Alexander Verl
Prof. Dr.-Ing. Prof. e. h. Dr.-Ing. e. h. Dr. h. c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

Bildquelle: MEV-Verlag

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.

ISSN: 2195-2892

ISBN: 978-3-8396-0547-9

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2013

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper

Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion

Von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von

Dipl.-Ing. Holger Haag
aus Bad Dürkheim

Hauptberichter: Univ.-Prof. a.D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult.
Engelbert Westkämper
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h.
Dieter Spath

Tag der mündlichen Prüfung: 20.03.2013

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart
2013

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart sowie am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Engelbert Westkämper für die zahlreichen Anregungen und die ständige vertrauensvolle Zusammenarbeit. Besonders danke ich ihm für die vielfältigen Erfahrungen, die ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei ihm sammeln durfte. Herrn Prof. Dr.-Ing Dieter Spath spreche ich meinen Dank für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts aus.

Allen meinen Kolleginnen und Kollegen am IFF und Fraunhofer IPA danke ich für die stets kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit. Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Alexander Schloske und Herrn Dipl.-Ing. Jörg Siegert, die mich mit ausgezeichneter fachlicher und menschlicher Betreuung bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Namentlich möchte ich mich außerdem bei Herrn Dipl.-Ing. Jochen Böck, Herrn Dipl.-Ing Gernot Frank, Herrn Dipl.-Ing. Max Dinkelmann, Herrn Dipl.-Ing. Oliver Mannuß und Herrn Dipl.-Übersetzer Andreas Meyke bedanken.

Stellvertretend für alle studentischen Hilfskräfte, Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiter und –arbeiterinnen, die mich während meiner Zeit am Institut unterstützt haben, gilt mein Dank Hong Anh Le, Jens Roos, Daniel Reiser, Joachim Heck, Christopher Sigloch und Dennis Vosseler. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft möchte ich für die Förderung der Forschergruppe „ECOMATION“ danken, im Rahmen derer die Ideen für diese Arbeit entstanden sind. Meinen Kollegen in der Forschergruppe Herrn Dipl.-Ing. Philipp Eberspächer, Herrn Dipl.-Ing. Jan Schlechtendahl und Herrn Dipl.-Ing. Steffen Braun danke ich für die zahlreichen Ideen und Diskussionen, welche maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Lebenspartnerin Verena und meinen Eltern für ihre moralische und langjährige Unterstützung bedanken.

Stuttgart, März 2013

Holger Haag

Kurzinhalt

Die weltweit steigende Nachfrage nach endlichen Ressourcen führt zu einer immer weiteren Preissteigerung dieser. Produzierende Unternehmen stehen im globalen Wettbewerb und können sich durch eine Steigerung der Energieeffizienz ökonomische Vorteile verschaffen. Zudem wird der ökologische Faktor bei der Energieeinsparung von Kunden positiv aufgenommen. Um die Energieeffizienz in der Produktion zu steigern, müssen die Zusammenhänge verstanden, Stellgrößen identifiziert und bewertet sowie geeignete Maßnahmen abgeleitet werden.

Die vorliegende Dissertation greift diese Punkte auf und führt sie zu einer modellbasierten Planungs- und Bewertungsmethodik zur Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion zusammen. Der grundlegende Modellierungsansatz besteht aus der Verknüpfung von Ressourcen der Hauptprozesse und der Peripherie auf Basis der Systemtechnik. Die einzelnen Ressourcen werden statusbasiert abgebildet, d.h. jeder vorhandenen Ressource werden spezifische Status zugewiesen. Außerdem erfolgt eine Zuordnung von individuellen Energieprofilen zum jeweiligen Status. Durch die Integration der Arbeitsplanung wird es möglich, verschiedene Planungsalternativen hinsichtlich ihres späteren energetischen Verhaltens bereits in der Planungsphase zu untersuchen und zu bewerten. Das ist erforderlich, da in dieser Phase ein Großteil des späteren energetischen Verhaltens festgelegt wird. Somit wird eine Möglichkeit geschaffen, dem Arbeitsplaner eine Entscheidungsgrundlage zur expliziten Betrachtung der Energie an die Hand zu geben. Die zusätzliche Integration der Arbeitssteuerung erlaubt es, eine Produktion permanent am energetisch bestmöglichen Betriebspunkt zu halten und Maßnahmen zur Minimierung der ungewünschten Teillastfälle abzuleiten. Hierfür wird ein bidirektionales Messaging-System verwendet, welches für den permanenten Datenaustausch zwischen den Ressourcen und der Leitebene zuständig ist. Ein entwickeltes Kennzahlensystem bildet die Basis zur Bewertung der verschiedenen möglichen Produktionsszenarien. Außer der Energieeffizienz werden noch weitere Zielgrößen der Produktion (Qualität, Durchlaufzeit, OEE) in die Bewertung mit einbezogen, um Korrelationen zwischen den einzelnen Kenngrößen abbilden zu können. Eine problemspezifische Gewichtung der einzelnen Kenngrößen erlaubt es, die Bewertungsmethode für verschiedene Fragestellungen zu verwenden.

Die Gesamtmethodik wird anhand einer Werkstattfertigung mit Bearbeitungszentren erprobt. Hierbei zeigt sich, dass große Einsparpotentiale vorhanden sind, die durch die organisatorische Optimierung der Produktion gehoben werden können, ohne in neue Technologien oder Maschinen zu investieren.

Short summary

As global demand is rising constantly, the sustainable use of natural resources is a central challenge for the next years. This high demand leads to shortages and thus to rising costs of energy purchase. Manufacturing companies are facing global competition and improving their resource efficiency can lead to both economic and ecologic benefits. But to increase the energy efficiency in production, interrelationships within the shop floor must be understood and suitable control variables have to be identified and applied.

The methodology developed in this thesis addresses these aspects and merges them to a model-based approach for the planning, evaluation and optimization of the energy consumption in factories. The basic methodology focuses on a state based modeling approach. This allows linking the states to the specific energy profiles. Therefore not only the resources of the main processes but also the peripheral systems have to be considered. The integration of process planning makes it possible to examine and evaluate different constellations of parameters during the planning phase already. This is important as the main aspects of the energetic behavior of a production are determined in this phase. Thus, the work planner is given the opportunity to get feedback concerning the energy efficiency and the energetic behavior of the planned system. The additional consideration of energetic aspects in the production planning and control allows operating the whole production continuously at the energetically best operating point by initiating suitable measures. This method is implemented using a bidirectional messaging system which is capable to manage a permanent exchange of data between the management system and the resources in the shop floor.

A developed key performance indicator (KPI) system forms the basis to evaluate the different parameter sets or possible scenarios. Including the classic objectives of production too, the user of the KPI system not only considers energy consumption but also overall equipment effectiveness (OEE), lead time and current stocks of the given production. A power function allows to weight these criteria with specific factors and to set them in relation to each other. This leads to the possibility of using the KPI system for different issues.

The methodology was evaluated on a scenario of a job-shop production with machining centers. It has proved that there are high energetic saving potentials which can be used by the organizational optimization of the production.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS.....	XI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	XIV
FORMELZEICHEN UND EINHEITEN.....	XVII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XXI
1 EINLEITUNG.....	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung.....	1
1.1.1 Ausgangssituation.....	1
1.1.2 Problemstellung.....	5
1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung.....	7
1.3 Aufbau der Arbeit.....	9
2 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK.....	11
2.1 Fabriken im Kontext der Energie.....	11
2.1.1 Energetische Grundlagen und Begriffe.....	11
2.1.2 Energetische Zusammenhänge in der Fabrik.....	13
2.2 Modelle zur Beschreibung der Fabrik.....	16
2.2.1 Die Fabrik als System.....	16
2.2.2 Periphere Ordnung und periphere Systeme in der Produktion.....	19
2.3 Ausgewählte Tätigkeiten der Arbeitsvorbereitung.....	27
2.3.1 Arbeitsplanerstellung und Operationsplanung.....	28
2.3.2 Relevante Tätigkeiten in der Arbeitssteuerung.....	33
2.4 Kennzahlensysteme und Kennzahlen.....	35
2.4.1 Kennzahlensysteme.....	38
2.4.2 Kennzahlen.....	39
2.5 Industrielle Kommunikationstechnik und Datenerfassung.....	43
2.5.1 Daten- und Informationsflüsse in der Fabrik.....	43
2.5.2 Datenerfassung, -aufbereitung und -auswertung.....	48

3	ANSÄTZE ZUR PLANUNG, BEWERTUNG UND OPTIMIERUNG DES ENERGETISCHEN VERHALTENS VON FABRIKEN	52
3.1	Bestehende Ansätze	52
3.2	Relevante Forschungsprojekte	59
3.3	Fazit und Abgrenzung der Arbeit	62
4	LÖSUNGSBAUSTEINE DER METHODIK ZUR PLANUNG UND BEWERTUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ	66
5	UMSETZUNG DER METHODIK ZUR PLANUNG UND BEWERTUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ.....	71
5.1	Aufbau der Methodik.....	71
5.2	Modellierung.....	72
5.2.1	Vorgehensweise der statusbasierten Modellierung von Ressourcen	73
5.2.2	Modellierung der Partialsysteme für die Hauptprozesse	75
5.2.3	Modellierung der Partialsysteme für die Peripherie	77
5.2.4	Zusammenführung der Partialsysteme zu einem Gesamtmodell.....	84
5.2.5	Anbindung einer Felddatenerfassung und Datenakquise.....	87
5.3	Roll-out des Gesamtmodells	89
5.4	Erweiterung der Arbeitsvorbereitung.....	89
5.4.1	Verknüpfung mit der Arbeitsplanung	90
5.4.2	Erweiterung der Arbeitssteuerung	95
5.5	Kennzahlensystem	100
5.5.1	Entwicklung eines Kennzahlensystems	101
5.5.2	Methode zur Bildung eines Referenzsystems	110
5.6	Prototypische Softwareumsetzung.....	111
5.7	Methode zur Optimierung der Energieeffizienz	112
5.7.1	Optimierung in der Arbeitsplanung / Planungskreis.....	115
5.7.2	Optimierung in der Arbeitssteuerung / Steuerungskreis.....	116
6	VALIDIERUNG DER METHODIK AM BEISPIEL DER SPANENDEN FERTIGUNG.....	119
6.1	Definition eines Anwendungsszenarios und Adaption der Methodik	119
6.2	Modellierung der Ressourcen	122

6.2.1	Partialsysteme der Hauptprozesse.....	122
6.2.2	Partialsysteme der Peripherie.....	124
6.3	Gesamtmodell und prototypische Softwareumsetzung.....	126
6.3.1	Kommunikation und Datenbereitstellung.....	129
6.3.2	Simulation von unterschiedlichen Parametersätzen und Szenarien.....	130
6.4	Bewertung der Energieeffizienz in der spanenden Fertigung.....	133
6.4.1	Bewertung auf Basis von Kennzahlen.....	133
6.5	Ableitung von geeigneten Handlungsstrategien.....	136
6.6	Abschließende Bewertung der Methodik.....	138
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	140
7.1	Zusammenfassung.....	140
7.2	Ausblick.....	142
	SUMMARY.....	143
	LITERATURVERZEICHNIS.....	145
	ANHANG.....	165

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung des weltweiten Energiebedarfs in der Industrie bis 2030 (nach [IEA 2008])	1
Abbildung 1-2: Endenergiebedarf nach Sektoren 2008 (links) und Endenergieverbrauch nach Energieträger in der Industrie (rechts) (in Anlehnung an [BMW 2010] und [BDEW 2010])	2
Abbildung 1-3: Verteilung des Energiebedarfs in der spanenden Verarbeitung (Bearbeitungs-zentrum, 2-Spindler) (eigene Darstellung, Daten nach [Engelmann 2009], [Schiefer 2001], [Westphal et al. 2011]).....	5
Abbildung 1-4: bestehende Defizite und abgeleitete Anforderungen	7
Abbildung 1-5: Aufbau der Arbeit.....	10
Abbildung 2-1: Energetische Zusammenhänge im Unternehmen (in Anlehnung an [Schmid 2004], [Delhi 1998] und [Fink et al. 1997]).....	13
Abbildung 2-2: Systemtechnisches Modell einer Fabrik (in Anlehnung an [Wiendahl 1997]).....	18
Abbildung 2-3: Systemtheorie als Basis der Modellierung (nach [Westkämper/Zahn 2009])	19
Abbildung 2-4: Verbrauchsstrukturanalyse einer Karosseriebauhalle (nach [Engelmann 2009]).....	20
Abbildung 2-5: Periphere Ordnung der Fabrik (nach [Schenk/Wirth 2004])	21
Abbildung 2-6: Subsysteme der zentralen KSS-Anlage (nach [Rahäuser et al. 2012]).....	22
Abbildung 2-7: Aufgaben der Arbeitsplanung (in Anlehnung an [Wiendahl 2010]).....	29
Abbildung 2-8: Phasen der Arbeitsplanung und der Operationsplanung (in Anlehnung an [Eversheim 2002], [Wiendahl 2010]).....	30
Abbildung 2-9: Systematik der Vorgabezeiten nach REFA [Binner 2005]	31
Abbildung 2-10: Teilgebiete und Funktionen der PPS (nach [Bornhäuser 2009] in Anlehnung an [Hackstein 1989])....	34
Abbildung 2-11: Kennzahlen im kybernetischen Regelkreis (in Anlehnung an [Baetge 1974], [Dyckhoff/Spengler 2007], [Herrmann 2010]).....	36
Abbildung 2-12: Einteilung der Verwendung von Kennzahlen (nach [Bauer 1988]).....	37
Abbildung 2-13: Vergleich der Kennzahlen nach festgelegten Kriterien	42
Abbildung 2-14: Automatisierungspyramide (in Anlehnung an [DIN 62264-1], [Krämer 2002], [VDI 5600], [Wellenreuther/Zastrow 2005])	43
Abbildung 2-15: Kommunikationsstandards in unterschiedlichen Ebenen (in Anlehnung an [Früh 2000]).....	44
Abbildung 2-16: Funktionalitäten und Datenfluss des MES (nach [Mussbach-Winter et al. 2010] und [Mussbach-Winter 2008]).....	47
Abbildung 2-17: Möglichkeiten der Datenerfassung (nach [Lotter/Wiendahl 2006] und [Köhrmann 2000]).....	49
Abbildung 2-18: Erfassung und Verarbeitung energetischer Daten (nach [VDI 4661]).....	50
Abbildung 3-1: Methode zur Ermittlung des Referenzbedarfs (nach [Kruska 2002]).....	53
Abbildung 3-2: Aufbau von TEEM (nach [Wahren 2010])	58
Abbildung 3-3: Aufbau der DFG Forschergruppe "ECOMATION"	61
Abbildung 3-4: Gegenüberstellung bestehender Ansätze zu Anforderungen	62
Abbildung 5-1: Methodik zur Planung, Bewertung und Optimierung.....	71
Abbildung 5-2: Lösungsbaustein „Modellierung“ im Kontext der Methodik.....	72

Abbildung 5-3: Statusbasierte Modellierung der Ressourcen	74
Abbildung 5-4: Gliederung der berücksichtigten peripheren Systeme (Einteilung nach [Schenk/Wirth 2004]).....	78
Abbildung 5-5: Modellierung der KSS-Anlage (1)	80
Abbildung 5-6: Modellierung der KSS-Anlage (2)	80
Abbildung 5-7: Exemplarisches Gesamtmodell einer Produktion (Energie- und Stoffströme).....	86
Abbildung 5-8: Exemplarisches Gesamtmodell einer Produktion (Informationsströme)	86
Abbildung 5-9: F-EIDL (Auszug) (nach [Eberspächer et al. 2012]).....	88
Abbildung 5-10: Lösungsbaustein „Erweiterung und Integration der Arbeitsvorbereitung“ im Kontext der Methodik...	90
Abbildung 5-11: Prozessenergieverbrauch und Ressourcenenergieverbrauch.....	92
Abbildung 5-12: Analyse der Einflussgrößen auf den Energieverbrauch in der Arbeitsplanung	93
Abbildung 5-13: Funktionalitäten der Kommunikationsarchitektur	96
Abbildung 5-14: Monitoring: Benötigte Informationen und Aufbau eines Datenpaketes	97
Abbildung 5-15: Messaging: Benötigte Informationen und Aufbau eines Datenpaketes	98
Abbildung 5-16: Lösungsbaustein „Kennzahlensystem“ im Kontext der Gesamtmethodik	100
Abbildung 5-17: gewählte Benennung im Kennzahlensystem.....	101
Abbildung 5-18: Zusammensetzung der Kennzahl „Energieverbrauch Hauptprozess".....	103
Abbildung 5-19: Zuordnung von REFA-Vorgabezeiten zu den Zeitanteilen der Zustände.....	103
Abbildung 5-20: Zusammensetzung der Kennzahl für das KSS-System	105
Abbildung 5-21: Zusammensetzung der Kennzahl für das Druckluftbereitstellungssystem	106
Abbildung 5-22: Aufteilung der HLK in Subsysteme	106
Abbildung 5-23: Zusammensetzung der Kennzahl für das Beleuchtungssystem	107
Abbildung 5-24: Kennzahlensystem zur Energieoptimierung	109
Abbildung 5-25: Lösungsbaustein „Optimierung und Maßnahmenableitung“ im Kontext der Gesamtmethodik	112
Abbildung 5-26: Paarweiser Vergleich zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren der Gütefunktion.....	114
Abbildung 5-27: Optimierung in der Arbeitsplanung / Planungskreis.....	116
Abbildung 5-28: Optimierung in der Arbeitssteuerung / Steuerungskreis	117
Abbildung 6-1: Fertigungsstrategien „zirkular“ (links) und „abzeilen“ (rechts) für Produkt 1 „Rechtecktasche“ (schematische Darstellung).....	119
Abbildung 6-2: Maße der zu fräsenden Taschen am Referenzbauteil.....	120
Abbildung 6-3: hinterlegtes Schichtsystem (0 = Arbeitszeit).....	121
Abbildung 6-4: Variationen zur energetischen Optimierung	121
Abbildung 6-5: Exeron DIGMA HSC 600 (Bildquelle: www.exeron.de).....	122
Abbildung 6-6: Beispielhafte Modellierung der Zustände (Kreistasche (zirkular und abzeilen))	124
Abbildung 6-7: Messwerte der Spindelkühlung (Bildquelle: ISW, Universität Stuttgart).....	125
Abbildung 6-8: gewähltes Produktionsszenario	127
Abbildung 6-9: Beispielhafte Parametrierung der Modelle über Arbeitspläne in MS Excel (Ausschnitt)	128
Abbildung 6-10: Beispielhafte Umsetzung der Modellierung in Plant Simulation 10 (Ausschnitt).....	129
Abbildung 6-11: Lastganglinien des Druckluftsystems bei unterschiedlichen Fertigungsstrategien	131
Abbildung 6-12: Paarweiser Vergleich zur Ermittlung der Gewichtungskriterien im Szenario	133

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 6-13: Bewertung der Planungsparameter.....	134
Abbildung 6-14: Einfluss verschiedener Puffer und Auftragsverteilungen (priorisiert).....	135
Abbildung 6-15: Einfluss verschiedener Puffer und Auftragsverteilungen (gleichverteilt).....	135
Abbildung 6-16: Korrelation der Gütekriterien.....	136
Abbildung 6-17: Optimierungsmöglichkeiten.....	137

Formelzeichen und Einheiten

Größe	Einheit	Bezeichnung
A_{KTL}	m ²	Teilbereich, der nicht mit Tageslicht versorgt wird
A_{TL}	m ²	Teilbereich, der mit Tageslicht versorgt wird
c	J/kgK	Spezifische Wärmekapazität von Wasser
c_c		Anstiegswert
\overline{E}_m		Wartungswert der Beleuchtungsstärke
E_{spez}	J/mm ³	Spezifische Zerspanungsenergie pro Zerspanvolumen
E_{th}	J	Energiebedarf an der Spanentstehungsstelle
$F_{t,n}$		Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit für Beleuchtung
f_F		Korrekturfaktor für Bearbeitungsform bzw. Hauptschnittfläche
f_{sv}		Korrekturfaktor für Schneidstoff
f_{ver}		Korrekturfaktor für Werkzeugverschleiß
f_{Verf}		Korrekturfaktor für Bearbeitungsverfahren
f_γ		Korrekturfaktor für Spanwinkel
f_λ		Korrekturfaktor für Neigungswinkel
g	m/s ²	Fallbeschleunigung
H	m	Förderhöhe einer Pumpe
h	h	Betriebsstunden pro Jahr
h	mm	Spanungsdicke
k_{EG}		Gütekriterium für den energetischen Effizienzgrad
k_{OEE}		Gütekriterium für die OEE
k_{DLZ}		Gütekriterium für die Durchlaufzeit
$k_{Bestand}$		Gütekriterium für den Bestand im System
k_{Termin}		Gütekriterium für die Termintreue
k_A		Minderungsfaktor zur Berücksichtigung des Bereichs mit Schaufgabe
$k_{c1.1}$		Hauptwert der spezifischen Schnittkraft nach Kienzle und Victor
k_L		Anpassungsfaktor Lampe für nicht stabförmige Leuchtstoffröhren
k_R		Anpassungsfaktor Raum

Größe	Einheit	Bezeichnung
m		produzierte Teile (Auftragsmenge)
m_s		Anzahl der Stationen
$m_{Gutteil}$		Menge der Gutteile
P	W	Leistung
$P_{el,Luft,ABL,p}$	W	Elektrische Leistung des Abluftventilators im Teillastfall p
$P_{el,Luft,ZUL,p}$	W	Elektrische Leistung des Zuluftventilators im Teillastfall p
P_{grund}	W	mittlere Grundleistung der Werkzeugmaschine
$P_{hydr,KSS}$	W	hydraulische Förderleistung der Pumpe
P_{leer}	W	Leerlaufleistung der Werkzeugmaschine
$P_{mech,KSS}$	W	mechanische Antriebsleistung (an der Welle bzw. Kupplung) der Pumpe
$P_{z,Beleuchtung}$	W	gemessene, geschätzte oder modellierte Leistung der Beleuchtungsanlage je Zustand
$P_{z,Druckluft}$	W	gemessene, geschätzte oder modellierte Leistung der Druckluftanlage je Zustand
$P_{z,Hauptprozess}$	W	Gemessene, geschätzte oder modellierte Leistung der Ressource des Hauptprozesses je Zustand
$P_{z,HLK}$	W	gemessene, geschätzte oder modellierte Leistung der der Beleuchtungsanlage je Zustand
$P_{z,KSS}$	W	gemessene, geschätzte oder modellierte Leistung der KSS-Anlage je Zustand
p		Teillastbereich
Q	m ³ /s	Förderstrom
T_B	h	Belegungszeit für das Betriebsmittel
T_D	h	(Soll-)Durchlaufzeit
t		Betrachtete Periode
t'_B	h	erweiterte werkstückbezogene Belegungszeit
t_{dS}	h	Durchführungszeit
$t_{eff,Nacht}$	h	Effektive Betriebszeit der Beleuchtung während der Nacht
$t_{eff,Tag,KTL}$	h	Effektive Betriebszeit im nicht-tageslichtversorgten Bereich
$t_{eff,Tag,TL}$	h	Effektive Betriebszeit der Beleuchtung im tageslichtversorgten Bereich
t_g	h	Grundzeit

Größe	Einheit	Bezeichnung
$t_{Lüftung}$	h	Betriebsstundenzahl der Lüftungsanlage
t_{pS}	h	planmäßige Durchlaufzeit
t_r	h	Rüstzeit
$t_{z,Beleuchtung}$	h	betriebszustandsabhängiger Zeitanteil
$t_{z,Druckluft}$	h	betriebszustandsabhängiger Zeitanteil
$t_{z,Hauptprozess}$	h	betriebszustandsabhängiger Zeitanteil
$t_{z,HLK}$	h	betriebszustandsabhängiger Zeitanteil
$t_{z,KSS}$	h	betriebszustandsabhängiger Zeitanteil
t_{zus}	h	Zusatzzeit zur Durchlaufzeit
t_{zws}	h	Zwischenzeit
V	mm ³	Zerspanvolumen
V_w	l	Volumen Wasser
W	J bzw. Wh	Energie bzw. Energieverbrauch
$W_{Beleuchtung}$	Wh	Energieverbrauch der Beleuchtungsanlage
$W_{Druckluft}$	Wh	Energieverbrauch der Druckluftanlage
W_{gesamt}	Wh	Gesamtenergieverbrauch des betrachteten Systems
$W_{Hauptprozess}$	Wh	Gesamtenergieverbrauch einer Ressource
W_{HLK}	Wh	Energieverbrauch der Heizung, Lüftung, Klimatisierung
W_{KSS}		Energieverbrauch der KSS-Anlage
$W_{Lüftung}$	Wh	Energieverbrauch der Lüftungsanlage
W_{Nutz}	Wh	Nutzbare, abgegebene Energie
$W_{Peripherie}$	Wh	Energieverbrauch der Peripherie
$W_{Prozess}$	Wh	Prozessspezifischer Energieverbrauch einer Ressource
W_{ref}	Wh	Referenzenergieverbrauch
$W_{Ressource}$	Wh	Ressourcenspezifischer Energieverbrauch einer Ressource
W_{spez}	Wh/Bezugs- größe	Spezifischer Energieverbrauch
$W_{therm,Anl.}$		Summe der Wärmequellen/-senken aus Maschinen und Geräten
$W_{therm,Bel}$		Summe der Wärmequellen/-senken aus der Beleuchtung

Größe	Einheit	Bezeichnung
$W_{therm, Ger.}$		Summe der Wärmequellen/-senken aus anderen elektrischen Geräten
$W_{therm, Heiz}$		Heizwärmebedarf
$W_{therm, Kühl}$		Kühlbedarf
$W_{therm, Senke}$		Summe der Wärmesenken
$W_{Wassererwärmung}$	Wh	Energieverbrauch der Wassererwärmungsanlage
W_{zu}	Wh	Zugeführte Energie
$W_{el. Bel, i, lx}$	W/(m ² *lx)	Spez. Elektrische Bewertungsleistung, bezogen auf die Grundfläche in lx
w_i		Spezifische Gewichtungsfaktoren
x		Prozentuale Einsparung pro Periode
Z		Anzahl der Zustände
$\eta_{Leistung}$		Leistungsgrad
η_{Nutz}		Nutzungsgrad/Verfügbarkeit
η_p		Pumpenwirkungsgrad
$\eta_{Qualität}$		Qualitätsgrad
η_{Quelle}		monatlicher Ausnutzungsgrad der Wärmequellen
η_{Wirk}		Wirkungsgrad
ϑ_k	K	Mittlere Kaltwasserzulauftemperatur
$\vartheta_{w,m}$	K	Mittlere Zapftemperatur
ρ	kg/m ³	Dichte des Mediums

Abkürzungsverzeichnis

AV	Arbeitsvorbereitung
BAZ	Bearbeitungszentrum
BDE	Betriebsdatenerfassung
DDE	Dynamic Data Exchange
DIN	Deutsches Institut für Normung
EIDL	Energy Information Description Language
EJ	Exa-Joule
ERP	Enterprise Resource Planning
F-EIDL	Factory Energy Information Description Language
GAE	Gesamtanlageneffektivität
HLK	Heizung, Lüftung, Klimatisierung
HSC	High Speed Cutting
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KSS	Kühlschmierstoff
LCC	Life Cycle Costing
MES	Manufacturing Execution System
Mtoe	Million Tons of Oil Equivalent
NC	Numerical Control
OEE	Overall Equipment Effectiveness (Gesamtanlageneffektivität)
OLE	Object Linking and Embedding
OPC	OLE for Process Control
PLS	Prozessleitsystem
PPS	Produktionsplanung und –steuerung
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
SCADA	Supervisory control and data acquisition
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCO	Total Cost of Ownership
TPM	Total Productive Maintenance
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VPS	Verbindungsprogrammierbare Steuerung
XML	Extensible Markup Language
XSD	XML Schema Definition

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

1.1.1 Ausgangssituation

Der nachhaltige Umgang mit den natürlichen Ressourcen stellt eine zentrale Herausforderung des 21. Jahrhunderts dar, da die weltweite Nachfrage nach diesen permanent steigt. Dies führt zu einer Verknappung und somit zu einer Verteuerung der endlichen Rohstoffe. [Neugebauer et al. 2008] Der Primärenergieverbrauch hat sich in Deutschland im gesamten produzierenden Gewerbe im Zeitraum von 2000 bis 2008 um 0,8% erhöht [Destatis 2010], während er sich in China mehr als verdoppelt hat [CSP 2009]. Abbildung 1-1 zeigt den prognostizierten weltweiten Energiebedarf bis zum Jahr 2030. Aus der Abbildung wird deutlich, dass der absolute Bedarf in den Hochtechnologie-regionen USA, Japan und Europa stagniert, in den Schwellen- und Entwicklungsländern hingegen permanent ansteigt.

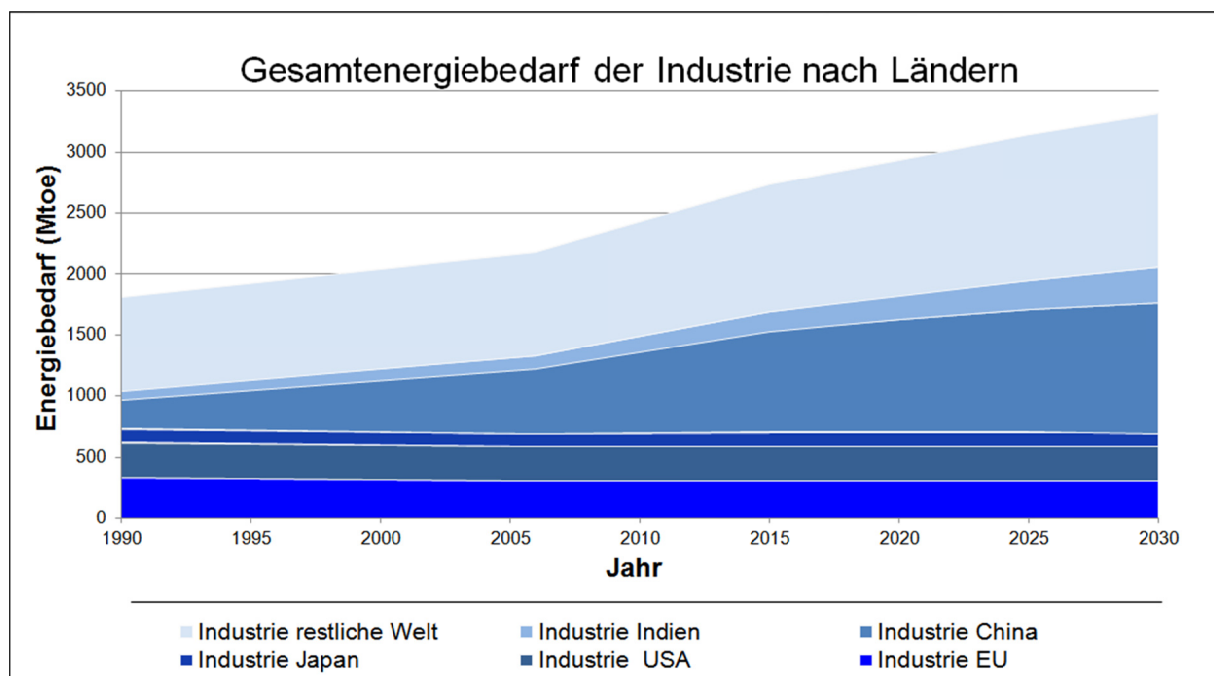


Abbildung 1-1: Entwicklung des weltweiten Energiebedarfs in der Industrie bis 2030 (nach [IEA 2008])

Dieser Anstieg ist auf das starke Bevölkerungswachstum und den steigenden Wohlstand (insbesondere in Indien und China) zurückzuführen. [IEA 2008] Die Stagnation des Energiebedarfs in den Industrieländern ist unter anderem in der Erhöhung der Energieeffizienz begründet. Allerdings gilt es hierbei zu beachten, dass es innerhalb der Produktionsbereiche zu Anteilsverschiebungen der Teilbereiche gekommen ist. [Destatis 2010]

In einer Shell-Studie von 2008 („*Shell energy scenarios to 2050*“) werden zwei verschiedene Szenarien zur Entwicklung des Energiebedarfs in der Zukunft vorgestellt: Im ersten Szenario wird davon ausgegangen, dass die Länder eigene energiepolitische Ziele verfolgen, im zweiten wird eine weltweite Zusammenarbeit zur Einsparung von Energie angenommen. Ausgehend von dem im Jahr 2000 weltweiten Primärenergiebedarf von ca. 417 EJ/Jahr wird der Bedarf bis 2030 auf 734 EJ/Jahr (Szenario 1) bzw. 692 EJ/Jahr (Szenario 2) ansteigen [Shell 2008]. Diese Szenarien machen deutlich, dass mit einem erheblichen Anstieg des Energiebedarfs zu rechnen ist, der durch eine weltweite Koordination zwar reduziert, aber nicht verhindert werden kann. Zusätzlich steigen die Preise für die Emission von Treibhausgasen permanent an. Durch die Möglichkeit des Handels mit Emissionszertifikaten wird ein zusätzlicher Anreiz geschaffen, Energie und somit CO₂ – Emissionen einzusparen. [Junge 2007]

Abbildung 1-2 verdeutlicht die Aufteilung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren sowie den Endenergieverbrauch der Industrie in Deutschland im Jahr 2008. Der Anteil der Industrie am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland betrug 2008 knapp 28% [BMWi 2010]. Hiervon nimmt der elektrische Strom mit rund 32% den größten Teil ein [BDEW 2010].

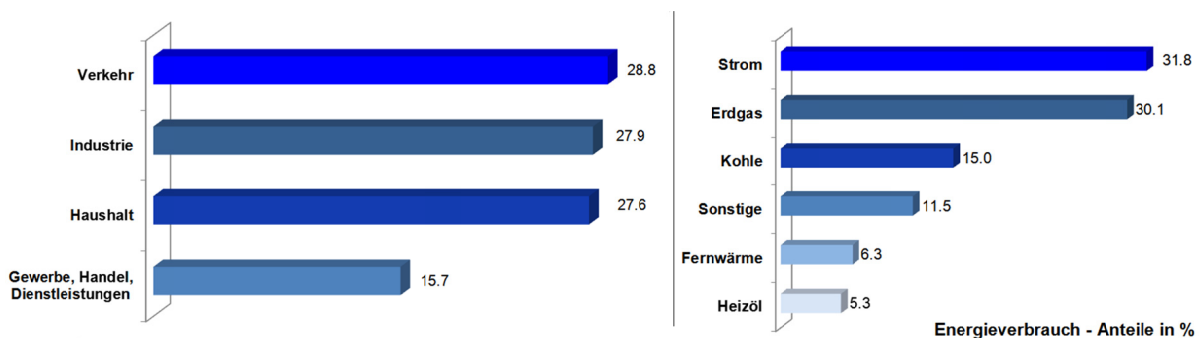


Abbildung 1-2: Endenergiebedarf nach Sektoren 2008 (links) und Endenergieverbrauch nach Energieträger in der Industrie (rechts) (in Anlehnung an [BMWi 2010] und [BDEW 2010])

Die Preise für elektrischen Strom, der an der europäischen Strombörse EEX gehandelt wird, haben sich in Deutschland vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2011 auf Basis des „EEX Baseload“ mehr als verdreifacht [EEX 2011]¹.

Diese Tatsachen machen deutlich, dass der Energie als Wettbewerbsfaktor in Zukunft eine steigende Bedeutung zugerechnet werden muss, da durch eine Energieeinsparung erhebliche Kostenvorteile erzielt werden können. Es gilt außerdem zu berücksichtigen, dass ein nachhaltiger Umgang mit den natürlichen Ressourcen in der Industrie sowohl von der Gesellschaft, als auch von Mitarbeitern und Kunden positiv bewertet wird.

So gaben in einer Umfrage der KfW-Bankengruppe aus dem Jahr 2005 knapp 25% der befragten Unternehmen an, dass die Umsetzung von energiesparenden Maßnahmen durch den Faktor „*Erlangung von Imagevorteilen*“ begünstigt wird [KfW 2005]. Im Jahr 2010 kam eine Umfrage des Prognos-Instituts zum Ergebnis, dass sich 16% der befragten KMU durch energiesparende Maßnahmen einen „*Imagegewinn*“ versprechen. 46% der Unternehmen gaben an, durch die Maßnahmen einen „*Beitrag zum Klimaschutz*“ leisten zu wollen. [Prognos 2010]

Das Thema der Energieeinsparung, das in der Vergangenheit insbesondere in den energieintensiven Branchen wie der Stahl- oder der Nichteisen-Metallerzeugung eine wesentliche Rolle spielte, gewinnt auch in anderen Branchen wie der z.B. Automobilindustrie zunehmend an Bedeutung [Müller et al. 2008]. Trotz eines niedrigen prozentualen Energiekostenanteils (gemessen an den Gesamtkosten) liegen die absoluten Energiekosten in einer Größenordnung, in der eine Optimierung zu deutlichen Einsparpotentialen führen kann [Leven 2005].

Im Konsumgüterbereich, insbesondere im Bereich der „*weißen Ware*“, wird die Energieeffizienz durch ein Energieeffizienzsiegel schon seit längerer Zeit vermarktet, im Investitionsgüterbereich herrscht dagegen noch Nachholbedarf. Sowohl Betreiber als auch Hersteller von Investitionsgütern haben dies erkannt. Das hat zur Folge, dass in den letzten Jahren das Thema Energieeffizienz zunehmend in den Fokus gerückt ist. Außerdem ist ein Trend zur Erweiterung des Bilanzrahmens hin zur Betrachtung des gesamten Lebenszyklus zu verzeichnen. Verantwortliche in Forschung und Industrie sind sich einig, dass zur weiteren Effizienzsteigerung die Zusammenhänge des Gesamtsystems betrachtet werden müssen. Themen wie Life Cycle Costing (LCC) und Total Cost of Ownership (TCO) werden im Hinblick auf die Energieeffizienz zunehmend bedeutender. [Bullinger et

¹ Beim EEX Baseload handelt es sich um einen quartalsweisen Durchschnittspreis für 24 Stunden Grundlaststrom, der an der EEX (European Energy Exchange) ermittelt wird.

al. 2009], [Herrmann et al. 2010], [Pyper 2010] Daher gibt es mittlerweile zahlreiche Methoden zur Ökobilanzierung von Produkten, deren Rahmenbedingungen in der DIN EN ISO 14040 genormt sind [DIN ISO 14040].

Auch die Politik sieht national und international bezüglich der Erhöhung der Ressourceneffizienz dringend Handlungsbedarf. Die EU schätzte im Jahr 2006 das Energieeinsparpotential in der verarbeitenden Industrie auf bis zu 25 % bis zum Jahr 2020 [EU 2006]. Vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit existiert ein Leitfaden, der für alle Branchen Anhaltspunkte liefern soll, wie Unternehmen mit der eingesetzten Energie effizienter und wirtschaftlicher umgehen können [BMU 2009].

Die EU-Kommission hat durch die sogenannte 20/20/20-Formel ehrgeizige Energieziele formuliert. Diese Formel sagt aus, dass bis 2020 im Vergleich zu 2005 die CO₂-Emissionen um 20% gesenkt, der Anteil der erneuerbaren Energien auf 20% des Endenergieverbrauchs erhöht und die Energieeffizienz um 20% gesteigert werden sollen. [McKinsey 2010]

Es existieren eine Vielzahl weiterer Richtlinien wie z.B. „Gesamteffizienz von Gebäuden (2002/91/EG)“, „Emissionshandelsrichtlinie (2003/87/EG)“, „Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG)“ sowie „Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen (2006/32/EG)“. Diese Richtlinien müssen von den Mitgliedsstaaten nach und nach in nationales Recht umgesetzt werden. In Deutschland wurde aus diesem Grund eine Vielzahl von Gesetzen erlassen, welche die Umsetzung der EU-Richtlinien sicherstellen. Hierzu zählen z.B. das Energiedienstleistungsgesetz [BMJ 2010], das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz [BMJ 2002] oder das Erneuerbare-Energien-Gesetz [BMJ 2002].

Das energetische Einsparpotential in der Produktion kann durch die Betrachtung aller beteiligten Ressourcen erreicht werden. Abbildung 1-3 verdeutlicht, dass bei der spanenden Fertigung neben den Bearbeitungsmaschinen insbesondere die Kühlschmierstoffversorgung (inkl. Absaugung), die Druckluftversorgung, die Beleuchtung sowie die Hallenlüftung wesentliche energetische Verbraucher darstellen. [Schiefer 2001], [Westphal et al. 2011] Hierbei ist zu beachten, dass in Abhängigkeit des gewählten Fertigungsverfahrens die prozentualen Angaben stark variieren können.

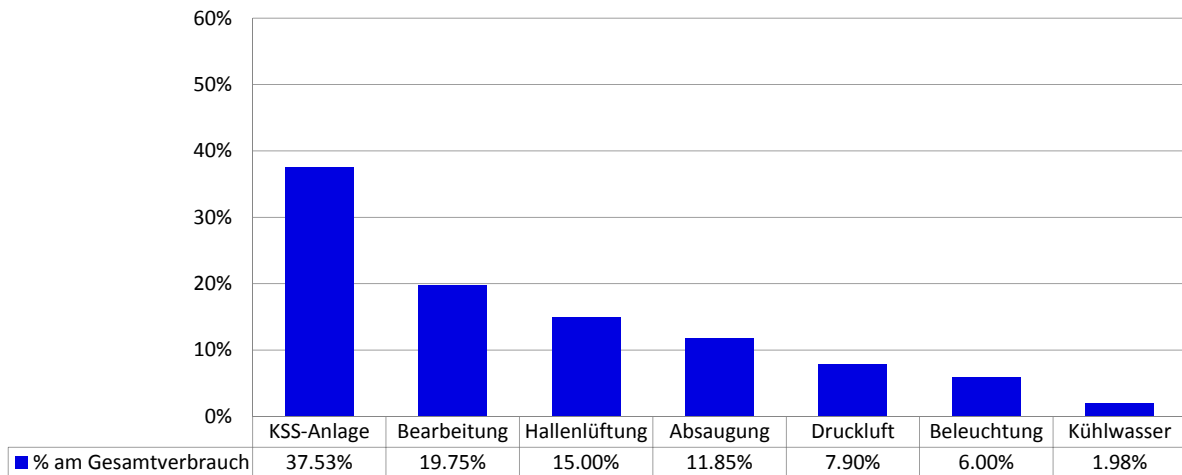


Abbildung 1-3: Verteilung des Energiebedarfs in der spanenden Verarbeitung (Bearbeitungszentrum, 2-Spindler) (eigene Darstellung, Daten nach [Engelmann 2009], [Schiefer 2001], [Westphal et al. 2011])

1.1.2 Problemstellung

Die oben genannten Ausführungen, insbesondere die von der EU definierten Energieziele machen deutlich, dass auch in produzierenden Unternehmen Handlungsbedarf bei der Erhöhung der Energieeffizienz besteht, da diese bis zum Jahr 2020 um 20% gesteigert werden soll.

Unternehmen achten im Allgemeinen auf die klassischen Leistungsziele der Produktion Qualität, Kosten und Zeit [Westkämper 2006]. In diesen wird die Energie jedoch nicht als explizite Größe berücksichtigt. Das hat zur Folge, dass es nur schwer möglich ist, ein Gesamtverständnis für den Energiebedarf auf verschiedenen Fabriksskalen sowie für das energetische Verhalten zu erlangen. Eine Umfrage der KfW-Bankengruppe aus dem Jahr 2005 kommt zum Fazit, dass neben den fehlenden finanziellen Mitteln insbesondere mangelndes internes Fachwissen über die energetischen Zusammenhänge ein Hemmnis für die Steigerung der Energieeffizienz in Unternehmen ist [KfW 2005]. Durch dieses fehlende Fachwissen sowie die Komplexität der Zusammenhänge ist auch eine energetische Bewertung von geplanten Maßnahmen methodisch nicht durchgängig möglich. Es ist zu erwarten, dass erhebliche Einsparpotentiale vorhanden sind, die erst durch eine durchgängige und ganzheitliche Methodik zur Betrachtung der Energieeffizienz in der Produktion erschlossen werden können.

Müller et al. sowie *Abele et al.* vertreten die Ansicht, dass die Energie als explizite Größe schon in den Planungsprozess mit aufgenommen werden muss, da der spätere Energiebedarf in der Produktion durch die Vorgaben aus der Planung maßgeblich beeinflusst und festgelegt wird. Während der

Betriebsphase sind hingegen energetische Effizienzsteigerungen nur noch schwer umsetzbar und häufig mit hohen Investitionskosten verbunden [Müller et al. 2008], [Abele et al. 2012].

Nach *Brecher et al.* sowie *Boos und Kuhlmann* ist der genaue Bedarf an Energie, Material und Hilfsmitteln auch auf Maschinenebene in den meisten produzierenden Unternehmen nicht bekannt [Brecher et al. 2009], [Boos/Kuhlmann 2010]. *Schmid* ist der Ansicht, dass die Energieanalyse einen zentralen Schritt hinsichtlich der Energieoptimierung darstellt und befasst sich mit der Frage, welche fachlichen und methodischen Aspekte bei einer Energieanalyse in einem Unternehmen berücksichtigt werden müssen. Sie vertritt die Auffassung, dass die energetischen Zusammenhänge in der Produktion komplex und schwer zu analysieren sind. [Schmid 2004] Um eine quantifizierbare Aussage dieser Komplexität bezüglich des energetischen Verhaltens eines Systems in aggregierter Form tätigen zu können, ist die Verwendung von Kennzahlen möglich. Das Problem hierbei liegt in der Tatsache, dass einzelne Kennzahlen in ihrer Aussage begrenzt sind. [Schlag/Runzheimer 2001] Um sie für eine Entscheidungsfindung verwenden zu können, ist es daher erforderlich, mehrere Kennzahlen miteinander zu verknüpfen [Meyer 2008], [Reichmann 2001]. Hierbei ist es wichtig, nicht nur eine, sondern mehrere Perspektiven in einer multikriteriellen Bewertung zusammenzuführen [Scheermesser 2003].

Im klassischen Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) wird die Energie im Normalfall nicht als explizite Größe berücksichtigt. Das führt dazu, dass auf die energetischen Verbraucher auch kein Einfluss genommen wird, was wiederum zu einer Energieverschwendung führt. Häufig werden zwar energetische Felddaten erfasst, jedoch erfolgt eine Weiterverarbeitung, Maßnahmenableitung oder Optimierung der Produktion auf Basis dieser Daten zumeist nicht. [Neugebauer et al. 2012], [Reinhart et al. 2011]

Im Bereich der energetischen Optimierung in der spanenden Fertigung liegt der Fokus meist auf der Optimierung der Werkzeugmaschinen durch den Austausch von Komponenten oder auf der Anpassung der Maschinensteuerung [Abele/Kuhrke 2010]. Um jedoch eine gesamte Produktion energetisch bewerten und optimieren zu können, reicht es nicht aus, die Fertigungsressourcen isoliert zu betrachten: Der Bilanzraum muss auf die gesamte Produktion mit ihrer Peripherie erweitert werden. Zusätzlich müssen organisatorische Potentiale berücksichtigt werden. Periphere Systeme wie z.B. Druckluftanlagen, KSS-Systeme oder das Beleuchtungssystem stellen nach Ansicht zahlreicher Autoren häufig große Energieverbraucher in der spanenden Fertigung dar, die im Kontext der „Energieeffizienz in der Produktion“ betrachtet werden müssen (vgl. Abbildung 1-3). [Rahäuser et al. 2011], [Eret/Meskell 2012], [Eberspächer et al. 2012]

1.2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es, einen Ansatz zu erarbeiten, der Planer und Betreiber von Fabriken sowohl bei der energetischen Planung und Bewertung, als auch bei einer möglichen energetischen Optimierung einer bestehenden Produktion unterstützt. Der Fokus soll hierbei auf der spannenden Bearbeitung mit Bearbeitungszentren und der elektrischen Energie liegen. Hierbei sollen die peripheren Systeme berücksichtigt werden. Technologische Optimierungen wie z.B. der Austausch von Komponenten bleiben unbetrachtet, da der Schwerpunkt auf der Untersuchung von organisatorischen Potentialen liegen soll. Abbildung 1-4 stellt die in der Problemstellung identifizierten Defizite sowie die daraus abgeleiteten Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik zur Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion dar:

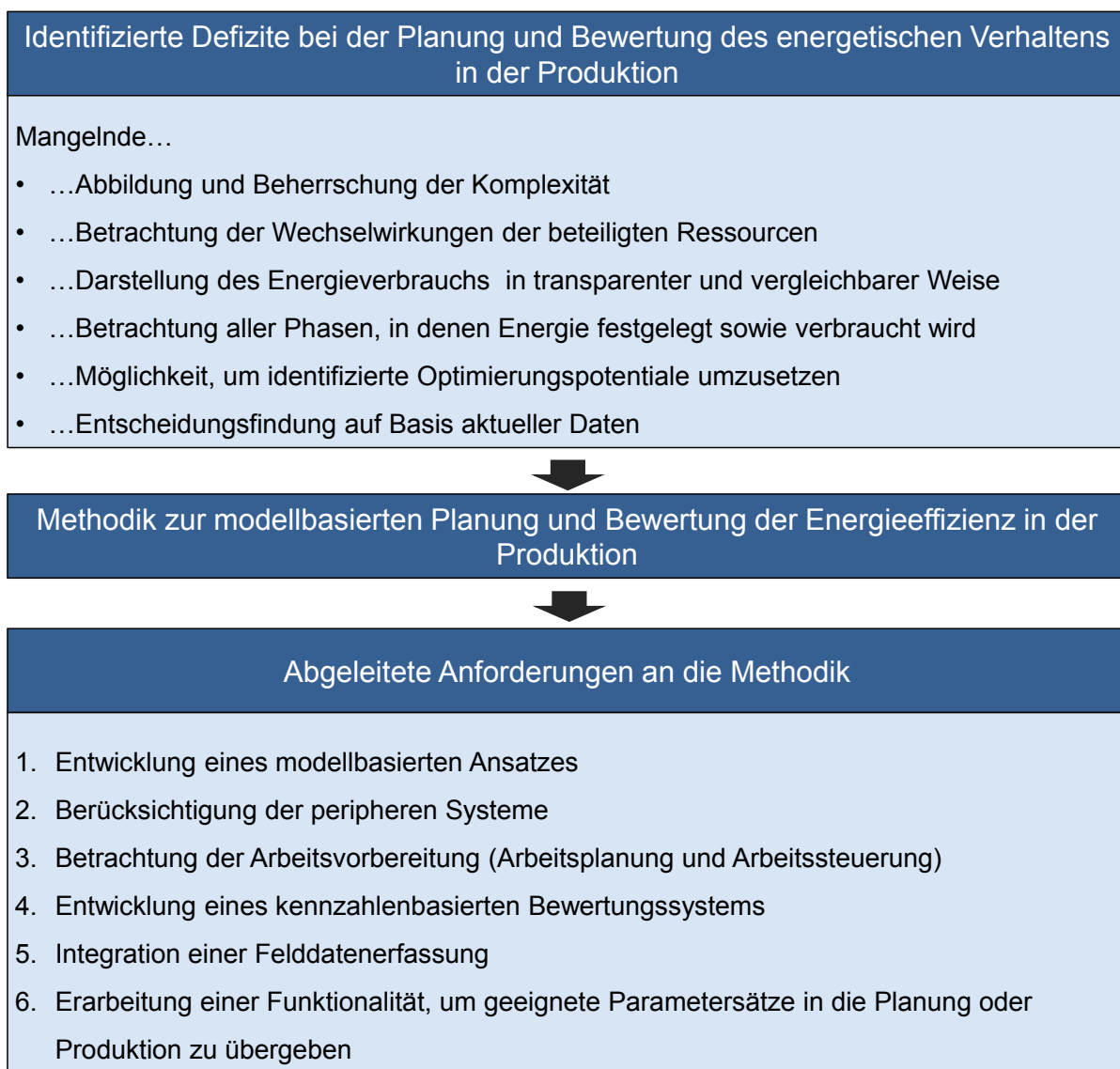


Abbildung 1-4: bestehende Defizite und abgeleitete Anforderungen

1. Beherrschung der Komplexität durch einen modellbasierten Ansatz

Die Beherrschung der hohen Komplexität kann durch die Unterstützung von Modellen erreicht werden. Um eine strukturierte und konsistente Erfassung der relevanten energetischen Zusammenhänge zu ermöglichen, muss eine Modellierung des Systems gewählt werden, die eine durchgängige Darstellung der Abhängigkeiten und Einflussgrößen von der einzelnen Ressource bis hin zum betrachteten Gesamtsystem ermöglicht. Dies erfordert eine Methodik, mit der die unterschiedlichen Skalen der Produktion abgebildet und damit die Produktion nicht nur als Ganzes, sondern auch die Systemelemente und Subsysteme energetisch modelliert werden können.

2. Berücksichtigung der Peripherie

Neben den eigentlichen Bearbeitungszentren müssen auch die peripheren Systeme mit einbezogen werden. Diese können für einen Großteil des Energieverbrauchs verantwortlich sein (vgl. Abbildung 1-3). Außerdem sind die Wechselwirkungen von Peripherie mit den Ressourcen der Hauptprozesse zu betrachten.

3. Berücksichtigung der Planungsphase

Ein besonderes Augenmerk muss zudem auf der Berücksichtigung von relevanten einmaligen und zyklischen Planungstätigkeiten im Rahmen der Arbeitsvorbereitung liegen, da in dieser Phase ein Großteil des späteren Energieverbrauchs beeinflusst werden kann.

4. Bewertung und Vergleich auf Basis von Kennzahlen

Um die modellierten Szenarien/Parametersätze bewerten zu können, ist es erforderlich, ein geeignetes Kennzahlensystem abzuleiten, mit dem eine höchstmögliche Aussagekraft bezüglich der Energieeffizienz in der Produktion getroffen werden kann. Hierbei müssen klassische Zielgrößen wie z.B. eine kurze Durchlaufzeit und die Vermeidung von hohen Beständen berücksichtigt werden. Das Kennzahlensystem soll zudem die Basis für die Ermittlung von Optimierungspotentialen darstellen.

5. Integration einer Felddatenerfassung

Die Bewertung von aktuellen oder zukünftigen Produktionsszenarien (vgl. Punkt 4) erfordert durchweg konsistente Daten. Hierbei stellen Felddaten eine umfassende Datenquelle dar. Eine zu implementierende Felddatenerfassung muss neben den Informationen über den Energieverbrauch auch sämtliche für die Produktion relevante Daten zur Verfügung stellen. Liegen keine Felddaten vor, muss eine Möglichkeit zur Berücksichtigung alternativer Datenquellen vorhanden sein.

6. Optimierungsmaßnahmen / Rückführung des optimalen Parametervektors

Als geeignet bewertete Parametersätze müssen in Form modifizierter Eingangsgrößen in die Arbeitsplanung oder -steuerung zurückgeführt werden. Das ist erforderlich, um in der Planung die energieoptimalen Vorgaben umzusetzen oder die laufende Produktion ständig am energetisch geeignetsten Betriebspunkt zu betreiben.

Mit Hilfe der zu entwickelnden Methodik soll es dem Anwender möglich werden, die erforderlichen Schritte von der Modellierung der energetischen Zusammenhänge bis zur Interpretation der Ergebnisse und der Ableitung von Optimierungspotentialen durchzuführen.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die wesentlichen Grundlagen und der Stand der Technik im Bezug zur Arbeit vorgestellt. Die Schwerpunkte liegen hierbei, basierend auf den abgeleiteten Anforderungen an die Methodik, auf den Themen „Fabriken im Kontext der Energie“, „Modelle zur Beschreibung der Fabrik“, „Arbeitsvorbereitung“, „Kennzahlen und Kennzahlensystemen“ sowie der „Industriellen Kommunikationstechnik und Datenerfassung“. Im Anschluss wird in Kapitel 3 eine detaillierte Analyse und Bewertung bestehender Ansätze zur Planung und Optimierung der Energieeffizienz in der Produktion vorgenommen. Die Kapitel 2 und 3 bilden somit die Basis für die Ableitung des konkreten Forschungsbedarfs.

Das 4. Kapitel dient der Vorstellung der erforderlichen Lösungsbausteine des eigenen Ansatzes. Darauf aufbauend wird in Kapitel 5 der eigene Ansatz, eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung des energetischen Verhaltens in der Produktion, erarbeitet. In Kapitel 6 wird die Validierung der erarbeiteten Methodik an einem Anwendungsbeispiel umgesetzt und so auf ihre Wirksamkeit hin überprüft. In Kapitel 7 werden dann die Ergebnisse und Erkenntnisse zusammengefasst sowie weitere sich ergebene Forschungsansätze dargestellt. (vgl. Abbildung 1-5)

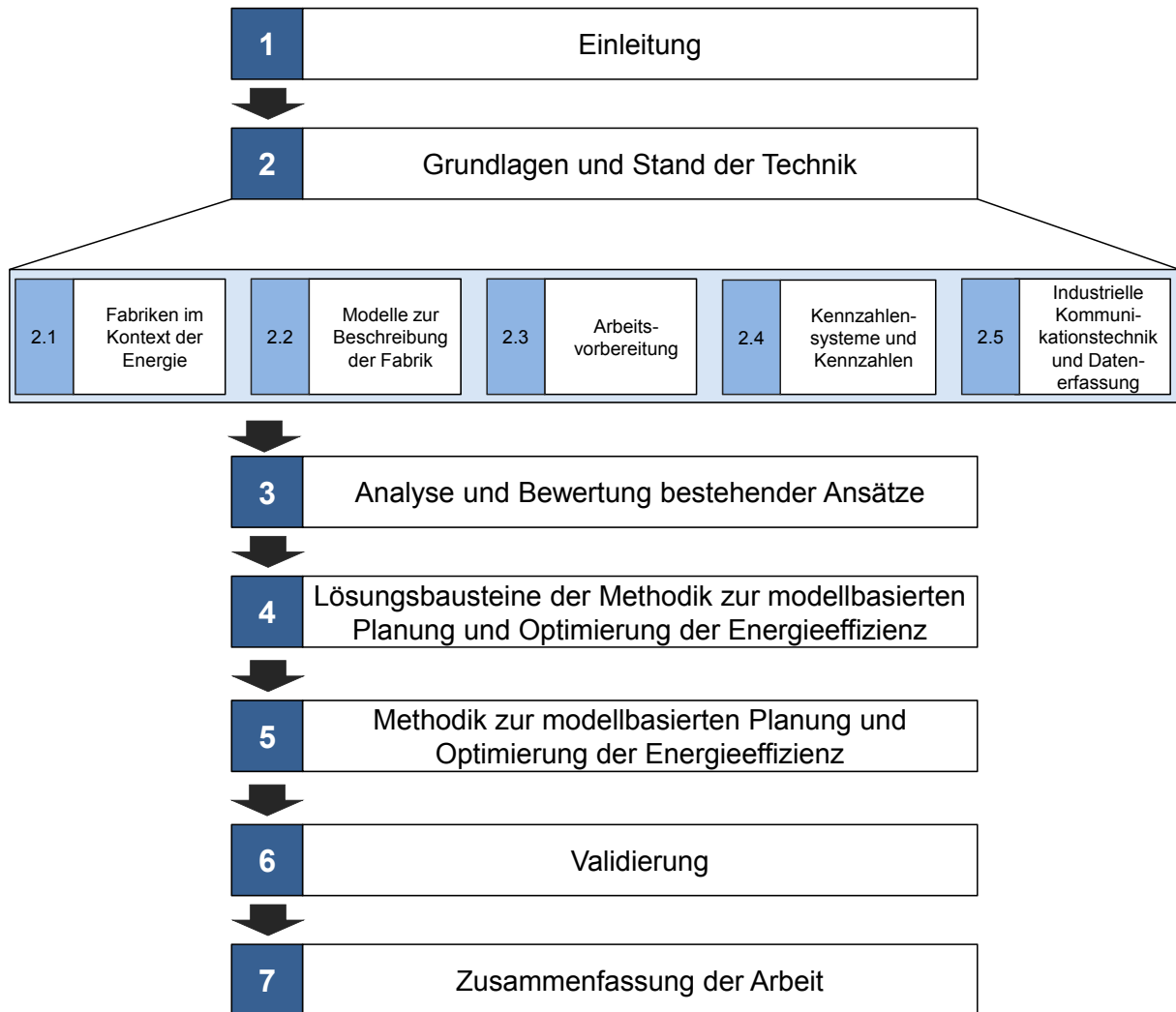


Abbildung 1-5: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Fabriken im Kontext der Energie

Fabriken sind komplexe Systeme, mit denen Erzeugnisse im industriellen Maßstab hergestellt werden können [Müller et al. 2009]. Sie können als technische, soziale, wirtschaftliche sowie umweltbezogene Leistungseinheit verstanden werden, deren Nutzen die Deckung des Bedarfs des Marktes ist [Westkämper 2006]. Der Faktor „Energie“ nimmt hierbei einen wesentlichen Platz ein, da in allen Bereichen der Fabrik Energie in verschiedenen Repräsentationen erforderlich ist.

Der folgende Absatz gibt einen Überblick über die energetischen Grundlagen und stellt Zusammenhänge sowie Einflussgrößen und Transformationsprozesse von Energie in der Fabrik dar. Der Fokus liegt hierbei gemäß der Zielsetzung der Arbeit auf der spannenden Fertigung.

2.1.1 Energetische Grundlagen und Begriffe

Energie, Leistung und Energieeffizienz

Unter der Energie W wird eine physikalische Größe verstanden, die sich durch Messung eindeutig bestimmen lässt. In der Physik wird die Arbeit der Energie gleichgesetzt. Die Maßeinheit ist das Joule [J], allerdings ist auch besonders im elektrischen Bereich eine Angabe in Wattstunden (Wh) oder Wattsekunden (Ws) üblich. [VDI 4661] Im Kontext der Energiegewinnung sind häufig die Einheiten „Steinkohleneinheit“ (SKE) oder „Öleinheit“ anzutreffen. Diese geben die in einem Energieträger gespeicherte Energie bezogen auf den Heizwert eines Kilogramms Kohle oder Öls an. [Weinert 2010]

Die Einheit Joule lässt sich aus SI-Basiseinheiten nach Formel 2-1 herleiten [Pelte 2010]:

$$[W] = J = kg \times m^2 \times s^{-2} \qquad \text{Formel 2-1}$$

Energie tritt in verschiedenen Erscheinungsformen auf, die nach *VDI 4661* in zwei unterschiedliche Klassen eingeteilt werden können [VDI 4661]:

- Als Eigenschaft eines thermodynamischen Systems („Systemenergie“)
- Bei Wechselwirkungen eines Systems mit einem anderen in Form von Arbeit, Wärme oder elektromagnetischer Strahlung („Prozessenergie“)

Energie kann weiter in Anergie und Exergie unterteilt werden (vgl. Formel 2-2):

$$Energie = Exergie + Anergie \quad \text{Formel 2-2}$$

Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik kann Energie weder erzeugt noch verbraucht, sondern nur umgewandelt werden. Das bedeutet, dass die Summe aus Exergie und Anergie stets konstant bleibt. [VDI 4661]

Exergie ist hierbei „die Arbeit, die maximal von einem System mit bestimmtem Anfangszustand in einer vorhandenen Umgebung geliefert werden kann“ [Hahne 2004]. Sie stellt somit den Teil der Energie dar, der in jede andere Energieform umgewandelt werden kann [Schmid 2004].

Bei der Anergie handelt es sich „um den nicht umwandelbaren Teil der Energie, bzw. um die Energie der Umgebung“ [Hahne 2004]. Daraus resultiert, dass der häufig verwendete Begriff „Energieverbrauch“ formal nicht korrekt ist. Der Begriff hat sich jedoch im Sprachgebrauch und in der Literatur verbreitet. Man versteht darunter die Menge der eingesetzten Energie. [DIN EN 16001]

Da es sich bei jeder Energieumwandlung um einen irreversiblen Prozess handelt, ist jede Wandlung mit Energieverlust behaftet. Das kann mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik begründet werden, nachdem sich bei jedem irreversiblen Prozess ein Teil der Exergie in Anergie umwandelt.

Unter der Leistung P wird die Energie pro Zeit verstanden, die in Watt angegeben wird (vgl. Formel 2-3):

$$[P] = J \times s^{-1} = W \quad \text{Formel 2-3}$$

Als Effizienz kann allgemein das Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen beschrieben werden (vgl. Formel 2-4).

$$Effizienz = \frac{Nutzen}{Aufwand} \quad \text{Formel 2-4}$$

Unter dem Begriff Energieeffizienz wird folglich das Verhältnis zwischen dem Ergebnis der Tätigkeiten, Waren oder Dienstleistungen (Nutzen) und der eingesetzten Energie (Aufwand) verstanden. [DIN EN 16001]

Der Nutzen kann hierbei je nach Betrachtungsgegenstand aufgabenspezifisch definiert werden.

2.1.2 Energetische Zusammenhänge in der Fabrik

Die energetischen Zusammenhänge in produzierenden Unternehmen können in Anlehnung an *Delhi* allgemein in Energiebezug, Energieumwandlung und -verteilung, Energieanwendung, Energierückgewinnung und Energieverlust eingeteilt werden (vgl. Abbildung 2-1) [Delhi 1998], [Schmid 2004]. Im Folgenden werden diese Teilaspekte näher betrachtet:

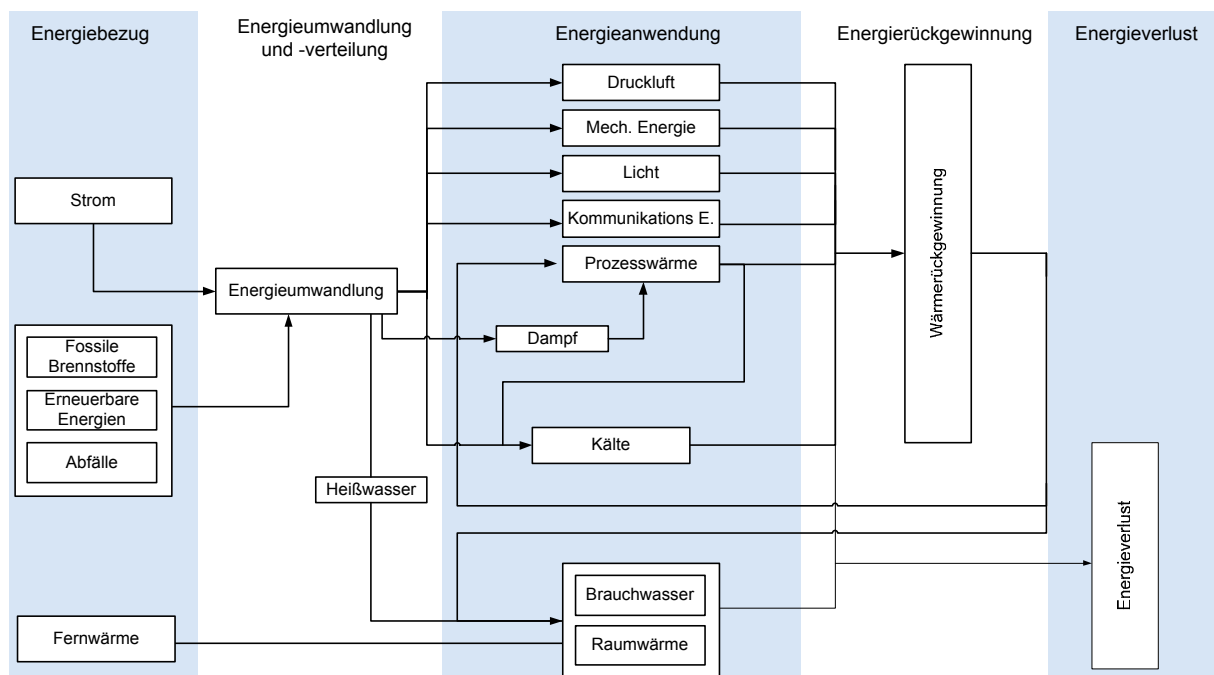


Abbildung 2-1: Energetische Zusammenhänge im Unternehmen (in Anlehnung an [Schmid 2004], [Delhi 1998] und [Fink et al. 1997])

Energiebezug

Energie wird in produzierenden Unternehmen meist in Form von thermischer Energie (z.B. als Wärme), mechanischer Arbeit, Licht und Nutzelektrizität benötigt. Hierfür müssen Unternehmen die benötigte Energie in Form von Primär- oder Sekundärenergieträgern beziehen. [Schmid 2004]

Zu den Sekundärenergieträgern zählen z.B. elektrischer Strom oder Heizöl. Diese werden aus Primärenergieträgern wie z.B. Erdgas, Erdöl, Kohle oder Uran hergestellt. [Lucas 2008] Unter „Primärenergie“ wird hierbei der Energieinhalt von Energieträgern oder regenerativen Energiequellen verstanden, die noch keiner Umwandlung unterworfen wurden. [Fink et al. 1997]

Die Umwandlung von Primär- zu Sekundärenergieträgern ist in der Praxis mit erheblichen Verlusten verbunden. Neben den reinen Umwandlungsverlusten, die zum Großteil in Abwärme verloren gehen, fallen Verluste z.B. beim Transport und beim Export an. [Lucas 2008], [BMWi 2010]

Beim Bezug von elektrischem Strom und Erdgas werden in der Regel sowohl ein Leistungs- als auch ein Arbeitspreis festgelegt, d.h. bei der Berechnung der Kosten werden die Verbrauchsmenge und die Spitzenleistung berücksichtigt [Schmid 2004]. Unternehmen müssen folglich nicht nur ihren kumulierten Verbrauch über eine Abrechnungsperiode, sondern auch die benötigte Spitzenlast bei der Kalkulation einbeziehen.

Energieumwandlung und Verteilung

Allgemein versteht man unter Energieumwandlung chemische und/oder physikalische Prozesse, in denen eine Energieform in eine oder mehrere andere Energieformen umgewandelt wird [Fink et al. 1997], [Lucas 2008].

Ziel der Energieumwandlung ist die Bereitstellung von Nutzenergie, die im Allgemeinen zum Zeitpunkt des Bedarfs aus Sekundärenergie mittels eines Energiewandlers zur Verfügung gestellt wird [Fink et al. 1997]. Die Effizienz der Ressourcen zur Energieumwandlung kann durch den energetischen Wirkungs- oder Nutzungsgrad bewertet werden.

In einer spanenden Produktion wird die Energie im Wesentlichen in Form von Wärme oder elektrischem Strom benötigt. [Schmid 2004]

Die Wärmebereitstellung wird nach dem benötigten Temperaturniveau klassifiziert. Für Brauchwasser und Raumwärme wird Warmwasser mit einem Temperaturniveau von 100°C bereitgestellt, für Prozesswärme bis 190°C kann Heißwasser eingesetzt werden. Für höhere Temperaturen erfolgt die Bereitstellung der Wärme z.B. mittels Dampf. Die technische Umsetzung erfolgt durch eine Vielzahl von Dampf-/Heißwassererzeugertypen, die je nach Anwendungs- und Leistungsbereich spezifische Bauarten aufweisen. Die Bereitstellung von Kälte zu Prozess- oder Klimatisierungszwecken erfolgt über Kompressions- oder Absorptionskälteanlagen. Diese werden mit Wärme oder Abwärme betrieben. [Schmid 2004], [Schmid et al. 2003]

Elektrischer Strom wird im Normalfall vom Energieversorger direkt bereitgestellt. Teilweise erfolgt die Stromerzeugung zusammen mit der Wärmebereitstellung durch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Die Umwandlung von elektrischem Strom in Nutzenergie ist durch Wirkungsgradverluste geprägt. Allerdings kann der Wirkungsgrad bei einer Transformation in mechanische Energie durch einen Motor bis zu 95% und bei einer Transformation in thermische Energie durch eine Elektroheizung bis nahezu 100% betragen. [Müller et al. 2009]

Energieanwendung

Energieanwendungen in produzierenden Unternehmen können in Anlehnung an Abbildung 2-1 in elektrische Anwendungen, Dampf- und Heißwasseranwendungen gegliedert werden. Im nachfol-

genden Abschnitt wird, Bezug nehmend zur Zielsetzung dieser Arbeit, auf die elektrischen Anwendungen in der spanenden Fertigung fokussiert:

Zu den elektrischen Anwendungen zählen hier u. a. die Druckluftbereitstellung, die Bereitstellung von mechanischer Energie sowie die Beleuchtung. Elektrische Antriebe sind für einen großen Teil des Energieverbrauchs verantwortlich, da z.B. Werkzeugmaschinen, Druckluftkompressoren und KSS-Pumpen elektrisch betrieben werden. Deren Einsatz ist wiederum mit Wirkungsgradverlusten verbunden. [Müller et al. 2009]

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Systeme werden detailliert in Kapitel 2.2.2 beschrieben.

Energierückgewinnung und Energieverlust

In energieintensiven Branchen wie z.B. der Stahl- oder der Nichteisen-Metallerzeugung fällt im Produktionsprozess eine große Menge von Abwärme an, welche zurückgewonnen werden kann. Ob Abwärme durch eine Energierückgewinnung genutzt werden kann, hängt vom Temperaturniveau des Energieträgers ab. Ist der Energiegehalt hoch genug, kann die Abwärme entweder auf einem niedrigeren Temperaturniveau verwendet (Nutzungskaskade), oder auf ein höheres Temperaturniveau aufgewertet werden. [Müller et al. 2009]

In der spanenden Bearbeitung, auf die diese Arbeit fokussiert, kann insbesondere im Bereich der peripheren Systeme wie z.B. der Druckluftversorgung die Weiterverwendung von Abwärme sinnvoll sein [Ruppelt/Bahr 2010]. Die Nutzung von kinetischer oder potenzieller Energie kann durch die Rückspeisung von Bremsenergie aus den Bremsvorgängen elektrischer Antriebe verwendet werden [Schröter et al. 2009].

Fazit: Fabriken im Kontext der Energie

In der Produktion existiert eine Vielzahl von energetischen Verlustarten, die einen Einfluss auf den Energiebedarf und das energetische Verhalten des Systems haben. Es gilt, diese Verluste sowohl zu minimieren als auch bei der Auslegung der Versorgungsanlagen und Infrastruktur zu berücksichtigen.

Das Verständnis der energetischen Zusammenhänge vom Energiebezug bis hin zur Energiebereitstellung und -zurückgewinnung stellt eine wichtige Grundlage für die energetische Planung, Bewertung und Optimierung einer bestehenden Produktion dar. Es wird deutlich, dass komplexe Wechselwirkungen und Abhängigkeiten auftreten können. Auch die konstruktive Ausprägung der erforderlichen Ressourcen vom Energiebezug bis hin zur Energierückgewinnung ist vielfältig und kaum überschaubar. Umso entscheidender ist eine methodisch strukturierte Modellierung sowie Abgrenzung des betrachteten Bilanzraums.

Im Rahmen dieser Arbeit wird gemäß der Zielsetzung auf die elektrische Energieanwendung in der spanenden Bearbeitung fokussiert. Die weiteren genannten Aspekte werden nicht eingehend betrachtet. Eine Beschreibung des Bilanzraums „Fabrik“ sowie der beteiligten Subsysteme erfolgt im nächsten Abschnitt.

2.2 Modelle zur Beschreibung der Fabrik

Bei Fabriken handelt es sich um komplexe Produkte, die von internen und externen Turbulenzen geprägt werden [Westkämper/Zahn 2009]. Um ein grundlegendes Verständnis für die Zusammenhänge und die Funktionsweise zu erlangen, sind Ansätze erforderlich, die diese in einer vereinfachten, aber dennoch hinreichend genauen und verständlichen Form abbilden. [Herrmann 2010], [Mallik 2008] Diese Anforderungen können durch geeignete Modelle erfüllt werden [Kühn 2006]. Sie können als „*Hilfsmittel für den Umgang mit der Realität*“ verstanden werden [Bossel 2004]. Unter einem Modell wird im Kontext dieser Arbeit die Definition des *VDI* verstanden, nach der es eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Systems in einem anderen System darstellt. Die Modellierung hat somit das Ziel, die untersuchungsrelevanten Eigenschaften des realen Systems abzubilden und dadurch die Grundlage für das Verstehen des Verhaltens und der Zusammenhänge des realen Systems zu bieten. [VDI 3633-1]

Ziel der Modellbildung (oder Modellierung) ist es, die wesentlichen Wirkungsstrukturen des Realsystems darzustellen. Die Voraussetzung hierfür ist, dass ein umfassendes Wissen über das Realsystem vorhanden ist. [Bossel 2004]

2.2.1 Die Fabrik als System

DIN-Norm 25424 definiert ein System als „*die Zusammenfassung von technisch-organisatorischen Mitteln zu autonomen Erfüllung eines Aufgabenkomplexes*“ [DIN 25424-1]. Nach Auffassung zahlreicher Autoren bildet ein System die zueinander in Beziehung stehenden Teile ab und kann entsprechend als ein ganzheitliches Abbild eines Unternehmens verstanden werden. [Henrich 2002], [Steins 2000], [Westkämper/Zahn 2009]

Schenk und Wirth verstehen unter der Fabrik als System die technischen Einrichtungen und Anlagen einer Fabrik. Eine funktionale Beschreibung eines Fabriksystems kann durch die Subsysteme erfolgen, die miteinander in Wechselwirkung stehen. Sie schlagen eine Gliederung in die Subsys-

teme Montagesystem, Fertigungssystem, Produktionssystem, Gebäudesystem und Fabrikssystem vor. [Schenk/Wirth 2004]

Montagesystem

Ein Montagesystem umfasst die Gesamtheit aller für einen Montagevorgang benötigten Teile und Einrichtungen. Hierzu zählen neben den Montagestationen auch Fördereinrichtungen oder physische Zwischenspeicher, die dazu dienen, die einzelnen Stationen zu verketteten oder zu entkoppeln. Ziel der Entkopplung ist die Vermeidung von Störauswirkungen auf nachgelagerte Stationen. [Loferrer 2002], [Lotter/Wiendahl 2006]

Fertigungssystem

Das Fertigungssystem dient der Herstellung von Erzeugnissen. Hierfür sind Ressourcen in Form von Bearbeitungsmaschinen sowie Material, Energie, Menschen, Kapital, Informationen und Wissen erforderlich. Auch Ressourcen für den Transport und die Lagerung können dem Fertigungssystem zugeordnet werden. [Schenk/Wirth 2004], [Westkämper 2006]

Produktionssystem

Das Produktionssystem umfasst neben den Ressourcen (Maschinen) auch die Gesamtheit an Betriebsmitteln, Produktionsstätten, sowie Energie und Informationen, d.h. es beinhaltet ein Regelwerk, nach dem die technologischen Prozesse abgeleitet und durchgeführt werden können. Der grundlegende Zweck des Produktionssystems besteht in der Herstellung der gewünschten Produkte nach Menge und Art. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese zum richtigen Zeitpunkt, in der gewünschten Qualität und zu akzeptablen Kosten hergestellt werden. [Westkämper 2006], [Schenk/Wirth 2004], [Kirsch 2008]

Beim Produktionssystem handelt es sich folglich nicht um ein Subsystem, welches sich physisch im Unternehmen lokalisieren lässt, sondern um einen Begriff, der die für den Produktionsprozess erforderlichen Ressourcen, Informationen sowie Energie- und Stoffströme subsummiert.

Gebäudesystem

Das Gebäudesystem beinhaltet die Gebäude mit ihren geometrischen- sowie Belastungsparametern. Es stellt die Schnittstelle zum Produktionssystem nach innen und zum Fabrikssystem nach außen dar. [Schenk/Wirth 2004]

Fabrikssystem

Die genannten Subsysteme bilden in Ihrer Gemeinsamkeit das Fabrikssystem ab, welches durch seine infrastrukturelle Anbindung mit der Außenwelt in Kontakt steht [Schenk/Wirth 2004].

Das Fabrikmodell eines produzierenden Unternehmens kann in ein systemtechnisches Modell überführt werden, welches die Zusammenhänge der Subsysteme verdeutlicht (vgl. Abbildung 2-2).

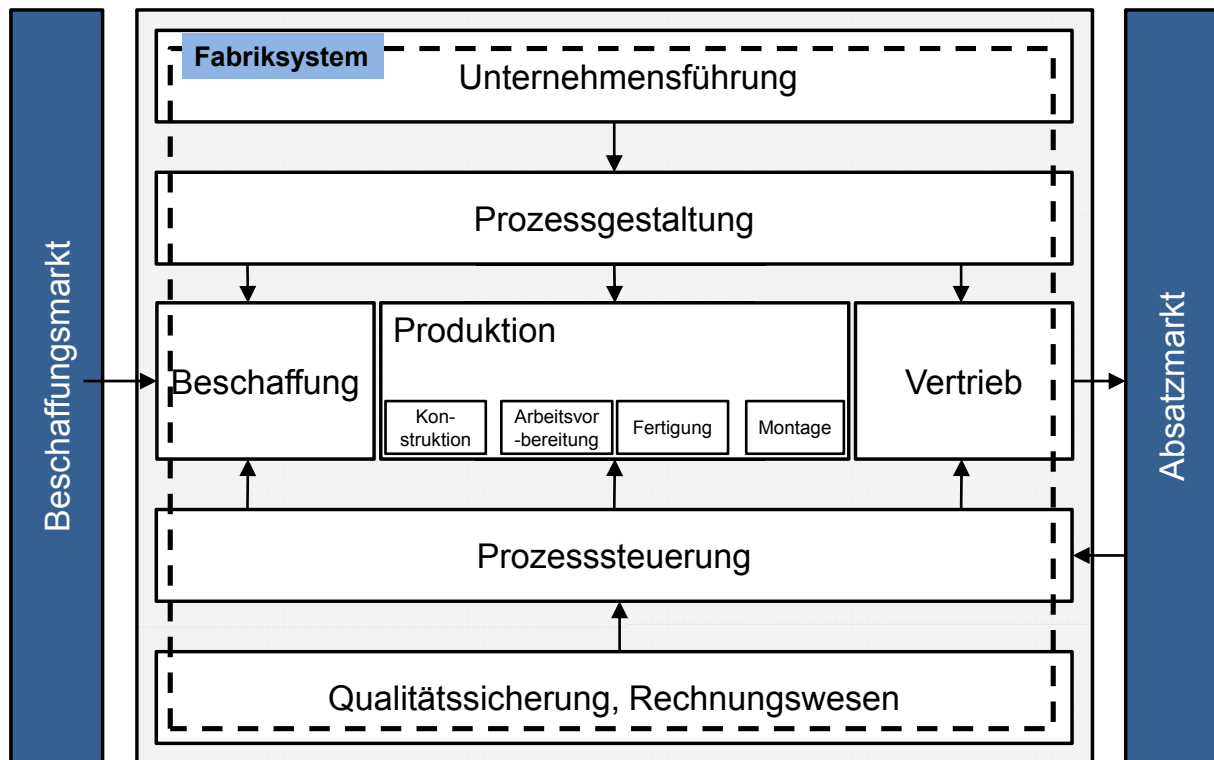


Abbildung 2-2: Systemtechnisches Modell einer Fabrik (in Anlehnung an [Wiendahl 1997])

Ansatz der Systemwissenschaften

Unter dem Begriff „Systemtheorie“ wird allgemein die Theorie verstanden, Elemente eines Systems bezüglich ihrer Struktur und Funktion miteinander in Bezug zu setzen. Hierbei kann zwischen dem funktionalen, dem strukturalen und dem hierarchischen Systemkonzept unterschieden werden, wobei das strukturelle Konzept am häufigsten zum Einsatz kommt. [Ropohl 2009]

Die Systemwissenschaft untersucht, als interdisziplinärer Ansatz, das Verhalten von komplexen Systemen. Sie wird häufig in die Teilgebiete Systemtheorie, Systemanalyse und Systemtechnik unterteilt, wobei die unterschiedlichen Teilsysteme häufig nicht klar voneinander abgegrenzt werden. Das hat zur Folge, dass die Begriffe häufig als Synonym verwendet werden. [Wiendahl 1997]

Nach *Westkämper und Zahn* wurde der allgemeine Ansatz der Systemtheorie in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt und gilt seit den 60er Jahren als interdisziplinäre Wissenschaft. Zu Beginn wurde der Ansatz vorrangig von den Naturwissenschaften geprägt, mittlerweile hat sich die Systemtheorie jedoch zu einem allgemeingültigen Bezugs- und Gestaltungsrahmen entwickelt, der sich zur Lösung von komplexen Problemen eignet. Im Kern können dadurch Elemente, die in Beziehung zueinander stehen, auf einer abstrakten Ebene abgebildet und beschrieben werden. Das

ermöglicht die Ableitung von möglichen Lösungs- und Handlungsansätzen. Die Systemgrenze stellt die Abgrenzung des betrachteten Systems gegenüber seinem Umfeld dar und muss in Abhängigkeit von der Fragestellung gewählt werden. [Westkämper/Zahn 2009]

Abbildung 2-3 zeigt dieses Systemverständnis und stellt die wesentlichen Grundsätze dieses Ansatzes dar.

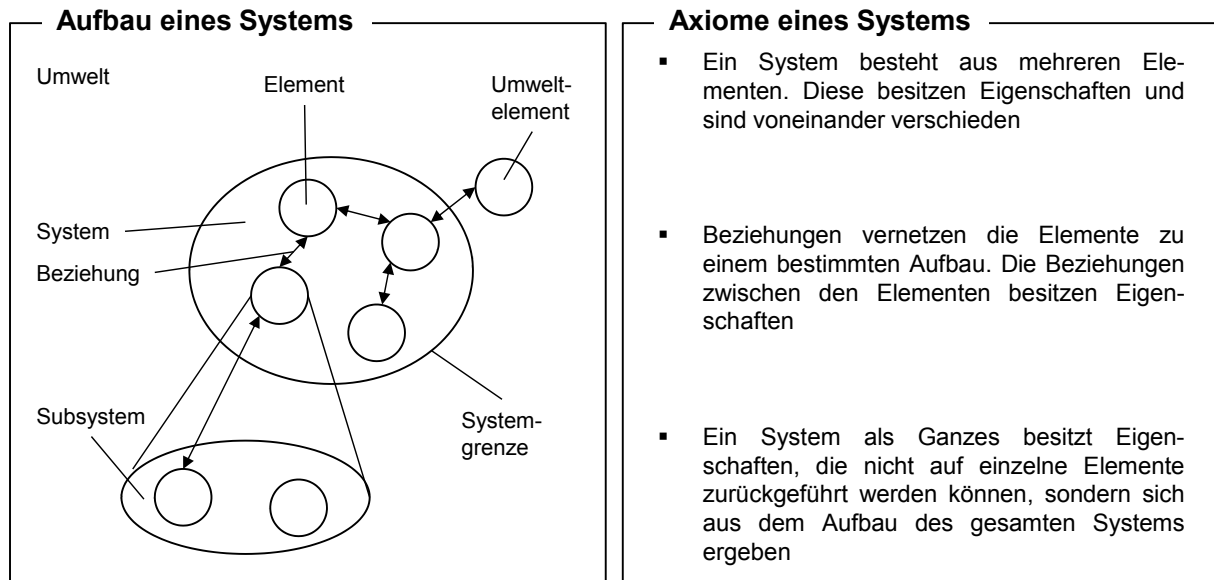


Abbildung 2-3: Systemtheorie als Basis der Modellierung (nach [Westkämper/Zahn 2009])

Die Systemgrenzen können z.B. einzelne Werkzeugmaschinen oder ein gesamtes Produktionsnetzwerk umfassen. Die konkrete Festlegung der Systemgrenze hängt hierbei von der zu untersuchenden Fragestellung ab. Mögliche Systemelemente („Leistungseinheiten“) stellen technische und organisatorische Prozesse der Produktion dar, die durch Informations-, Material- und Energiefluss miteinander verknüpft sind. [Westkämper/Zahn 2009]

Schmigalla sieht die systemtheoretische Betrachtungsweise der Fabrik als theoretischen Hauptausgangspunkt für eine systematische Fabrikplanung. Danach wird durch den systemtheoretischen Ansatz Ordnung in den Objektbereich gebracht und gleichzeitig die Voraussetzung für ein systematisches Projektieren geschaffen. [Schmigalla 1995]

2.2.2 Periphere Ordnung und periphere Systeme in der Produktion

Produzierende Unternehmen können durch ihr peripheres Ordnungsmodell beschrieben werden. Hierbei werden sämtliche im Unternehmen vorhandene Subsysteme gemäß ihrem Bezug zu den

Ressourcen der Hauptprozesse (Maschinen) sowie ihrer Abhängigkeit vom Produktionsprogramm beschrieben.

Diese Aufteilung ist bei der energetischen Betrachtung eines produzierenden Unternehmens sinnvoll, da die peripheren, nicht wertschöpfenden Teilsysteme häufig für einen Großteil des Energieverbrauchs zuständig sind [Schiefer 2001], [Engelmann 2009]. Die folgende Abbildung 2-4 zeigt beispielhaft die Verbrauchsstrukturanalyse einer Karosseriebauhalle.

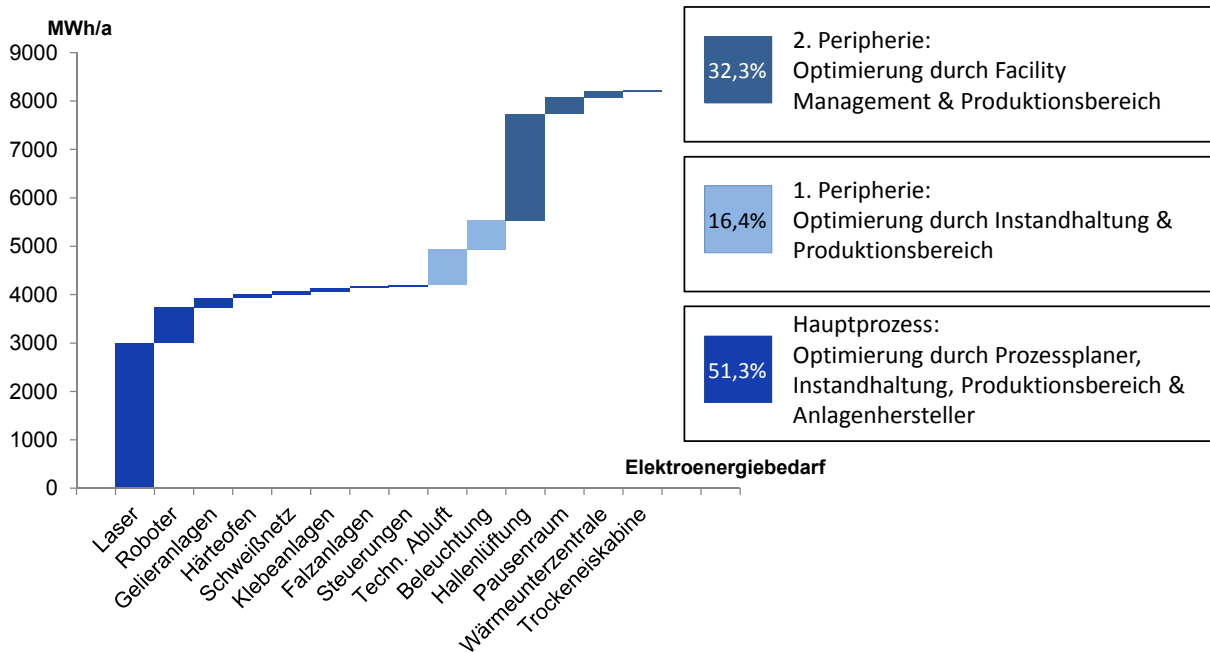


Abbildung 2-4: Verbrauchsstrukturanalyse einer Karosseriebauhalle (nach [Engelmann 2009])

Hierbei wird deutlich, dass die Peripherie in diesem Fall für knapp die Hälfte des Energieverbrauchs verantwortlich ist. Die Aufteilung des Energieverbrauchs nach peripherer Ordnung stellt somit einen grundlegenden Schritt zur energetischen Optimierung dar, weil dadurch Einflussparameter auf die Subsysteme identifiziert werden können. [Engelmann 2009], [Müller et al. 2009]

Die periphere Ordnung einer Fabrik kann mit dem Peripheriemodell nach *Schenk und Wirth* beschrieben werden. Das Modell gliedert die Fabrik in drei periphere Ordnungen, die um die wertschöpfenden Produktionsprozesse angeordnet sind. Es zielt somit darauf ab, ein Grundverständnis der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen aller beteiligten Systeme untereinander in transparenter Weise zu entwickeln. Es gilt zu beachten, dass eine exakte und eindeutige Zuordnung der Systeme zu einem peripheren Grad häufig nicht umsetzbar ist. [Müller et al. 2009], [Schenk/Wirth 2004]

Nach *Schenk und Wirth* können die peripheren Systeme in Systeme erster, zweiter und dritter Ordnung gegliedert werden (vgl. Abbildung 2-5) [Schenk/Wirth 2004]:

- Die 1. Peripherie umfasst Systeme, die direkt vom Produktionsprogramm und somit von den Hauptprozessen abhängen.
- Die 2. Peripherie beinhaltet Anlagen, die zwar nicht vom Produktionsprogramm, aber direkt von den Hauptprozessen abhängig sind.
- Die 3. Peripherie fasst Anlagen, die nicht von den Hauptprozessen abhängig sind, zusammen.

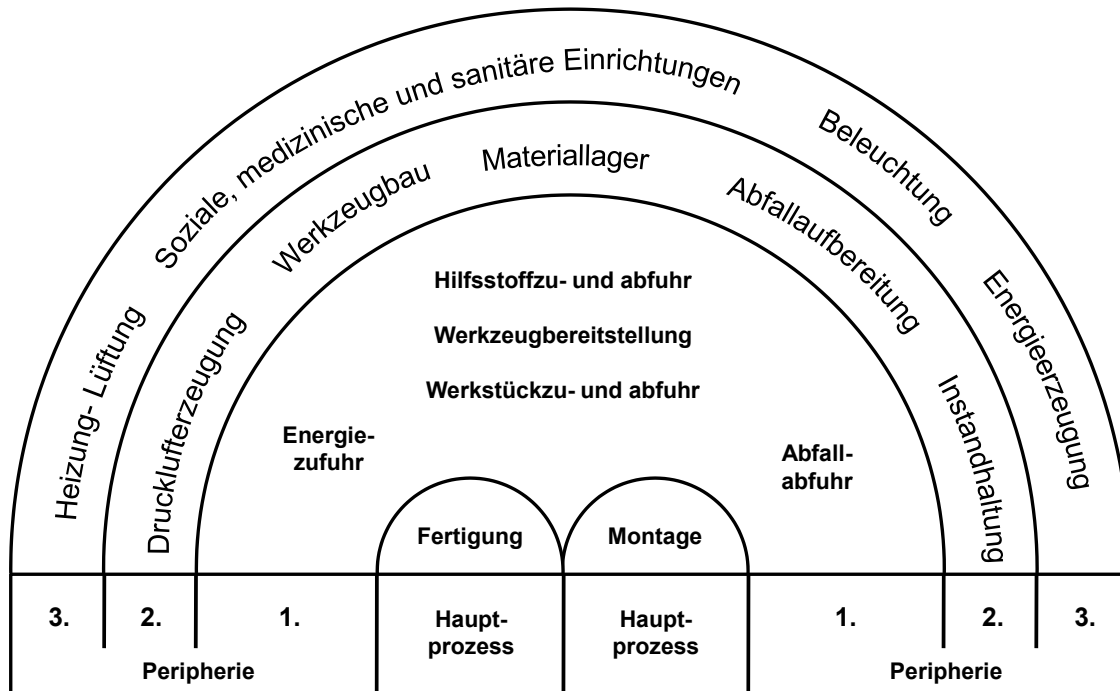


Abbildung 2-5: Periphere Ordnung der Fabrik (nach [Schenk/Wirth 2004])

Im folgenden Absatz werden die in der Problemstellung identifizierten und für diese Arbeit relevanten peripheren Systeme beschrieben sowie die wesentlichen Optimierungspotentiale aufgezeigt (vgl. Kapitel 1). Es werden außerdem Berechnungsformeln zur Bestimmung des Energiebedarfs des jeweiligen Systems angegeben, da aus diesen die Einflussgrößen auf den Energieverbrauch hervorgehen.

2.2.2.1 Peripherie erster Ordnung

Für den reibungslosen Ablauf der Hauptprozesse sind Hilfsprozesse erforderlich, die einen sicheren Betrieb gewährleisten, jedoch keinen direkten Beitrag zur eigentlichen Wertschöpfung leisten. Durch die direkte Abhängigkeit vom Produktionsprogramm hat eine Senkung oder Erhöhung der Produktionsmenge einen direkten Einfluss auf die Hilfsprozesse. [Schenk/Wirth 2004], [Müller et

al. 2009] Im Rahmen dieser Arbeit wird die Kühlschmierstoffversorgung der ersten peripheren Ordnung zugeteilt (vgl. Kapitel 1) (Abbildung 2-5):

Nebenaggregate/Kühlschmierstoffversorgung

Die Kühlschmierstoffversorgung (KSS-Versorgung) stellt ein typisches System der ersten Peripherie dar. Je nach Anforderung und Anordnung der Ressourcen der Hauptprozesse kommen Einzel- oder Zentralkreislaufsysteme zum Einsatz. Ihre Hauptaufgabe besteht in der Kühlung, der Schmierung, der Spülung und den Späneabtransport (vgl. Abbildung 2-6). In der Praxis zählen Kreiselpumpen zu der am häufigsten verwendeten Pumpenbauart. [VDI 3035]

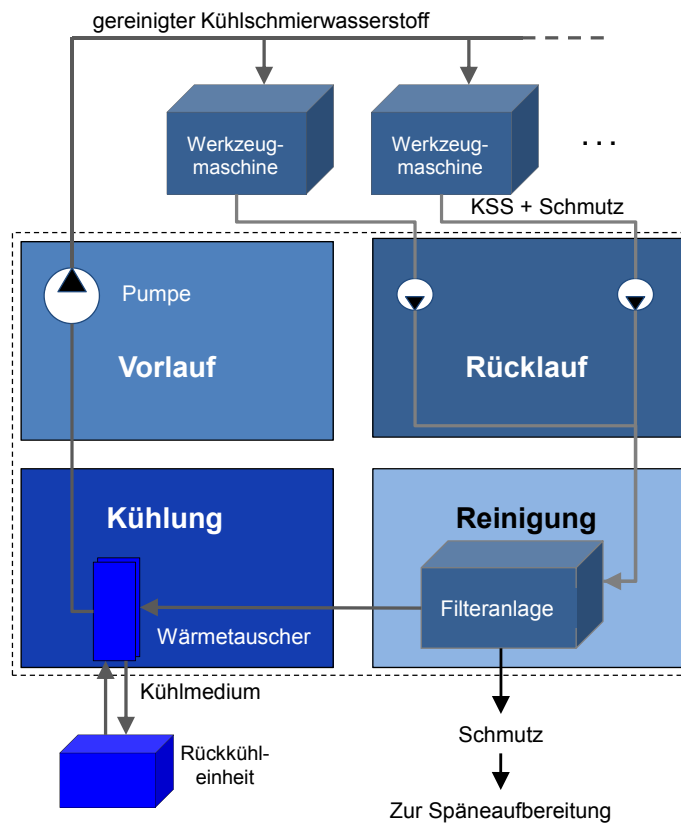


Abbildung 2-6: Subsysteme der zentralen KSS-Anlage (nach [Rahäuser et al. 2012])

Der Leistungsbedarf einer KSS-Pumpe kann durch die folgende Formel abgeschätzt werden, die das Verhältnis von Förderleistung zum Pumpenwirkungsgrad beinhaltet [Wagner 2009]:

$$P_{mech,KSS} = \frac{P_{hydr,KSS}}{\eta_P} = \frac{\rho \times g \times Q \times H}{\eta_P} \tag{Formel 2-5}$$

Durch die Multiplikation mit einem Sicherheitsbeiwert bzw. Leistungszuschlag zwischen 10 und 20% des Leistungsbedarfs kann die erforderliche Anschlussleistung errechnet werden [Wagner 2009].

KSS-Anlagen können in der spanenden Fertigung für einen großen Teil des Energieverbrauchs verantwortlich sein, außerdem können erhebliche Einsparpotentiale durch technische und organisatorische Optimierung von KSS-Anlagen erzielt werden. [Rahäuser et al. 2011], [Brecher et al. 2010a] Eine Optimierung der KSS-Versorgung kann z.B. durch die Verkürzung der Bearbeitungszeiten der Hauptressourcen, die Abschaltung der Pumpen in Nebenzeiten oder die Anpassung der KSS-Menge sowie der KSS-Temperatur erreicht werden. Zusätzlich sind bei der KSS-Aufbereitung Einsparpotentiale vorhanden. Bei der Optimierung ist auf die thermische Stabilität der Maschine zu achten, die nur durch eine ausreichende Vorlaufzeit gewährleistet werden kann. Außerdem gilt es, die KSS-Menge so auszulegen, dass selbst bei extremen Bearbeitungssituationen eine Versorgung mit KSS gewährleistet ist. [Brecher et al. 2010a], [Brecher et al. 2010b]

2.2.2.2 Peripherie zweiter Ordnung

Die Peripherie der zweiten Ordnung beinhaltet maschinennahe Prozesse, die von den Hauptprozessen abhängig sind, nicht jedoch direkt vom Produktionsprogramm [Schenk/Wirth 2004]. Zu den typischen Vertretern zählen im Rahmen dieser Arbeit Druckluftversorgungssysteme, die im Folgenden näher betrachtet werden (vgl. Kapitel 1):

Druckluftversorgung

Die Erzeugung von Druckluft erfolgt im Wesentlichen über einen oder mehrere Kompressoren mit Druckspeicherkesseln. Zusätzlich können Kühlaggregate und Entfeuchter Teil des Systems sein. Druckluft wird über ein Rohrleitungssystem aus Ring- oder Stichleitungen an die Verwendungsstelle geführt. Die komprimierte Luft wird dort in eine lineare oder rotatorische Bewegung umgewandelt. Im industriellen Umfeld existieren eine Vielzahl von Druckluftanwendungen wie z.B. handgeführte Werkzeuge oder Reinigungsanwendungen. [Müller et al. 2009] Auch Werkzeugspannsysteme, Werkzeugwechsler oder die Türen von Bearbeitungsmaschinen können druckluftbetrieben sein. Pneumatische Systeme haben im Vergleich zu elektrischen Systemen mehrere Vorteile, wie z.B. eine gute Regelbarkeit oder die ausbleibende Explosionsgefährdung (z.B. durch Funkenschlag). Der Nachteil liegt in der Ineffizienz von Druckluftsystemen, denn es werden nur 5% bis 20% der eingesetzten elektrischen Energie in mechanische Arbeit umgewandelt. Die Gründe hierfür liegen sowohl in der Entstehung von Wärme sowie Reibungsverlusten im Kompressor als auch in Leckageverlusten, die in den Verteilungsnetzen entstehen. [Schmid 2004], [BLFU 2007] Durch die Reduktion von Leckageverlusten wird das Energieeinsparpotential bei der Erzeugung, Verteilung und Anwendung von Druckluft auf bis zu 43% geschätzt [Kupp 2008], [ENRW 2005].

Die theoretische Beschreibung der Leistungsaufnahme des Verdichters erfolgt unter der Annahme einer adiabaten Zustandsänderung. Diese lässt sich in der Realität jedoch nicht verwirklichen. Die Berechnung der realen Leistungsaufnahme muss unter Berücksichtigung von Reibungs- und Wärmeverlusten im Verdichter erfolgen [Ruppelt 2003].

Für die industrielle Anwendung wird von einem idealen Betriebsdruck von 6 bis 6,5 bar an der Wirkstelle ausgegangen, häufig ist jedoch ein geringerer Betriebsdruck ausreichend. Durch den schlechten Wirkungsgrad von Druckluftsystemen kann eine Senkung des Betriebsdrucks zu großen Einsparpotentialen führen. [Ruppelt 2003]

Des Weiteren sind eine Anpassung der erzeugten Druckluftmenge, die Minimierung von Leckageverlusten, die anwendungsoptimale Auslegung von Kompressor und Druckluftspeicher sowie die Möglichkeit der Wärmerückgewinnung potentielle Optimierungskriterien [Schmid 2004].

Die nachfolgende Tabelle fasst abschließend die wesentlichen Energieeinsparmaßnahmen im Bereich der Druckluftversorgung zusammen:

Tabelle 2-1: Einsparpotentiale bei der Druckluftversorgung (nach [Radgen et al. 2001])

Energieeinsparmaßnahme	Anwendbarkeit ¹	Effizienzgewinn	Gesamtpotenzial
Neuanlagen oder Ersatzinvestitionen			
Hocheffiziente Motoren	25%	2%	0,5%
Drehzahlvariable Antriebe	25%	15%	3,8%
Optimale Kompressorenauswahl	30%	7%	2,1%
Einsatz effizienter Steuerungen	20%	12%	2,4%
Wärmerückgewinnung	20%	20%	4%
Verbesserte Druckluftaufbereitung	10%	5%	0,5%
Gesamtanlagenauslegung inkl. Mehrdruckanlagen	50%	9%	4,5%
Reduzierung des Druckverlustes	50%	3%	1,5%
Optimierung von Druckluftgeräten	5%	40%	2%
Anlagenbetrieb und Instandhaltung			
Verminderung der Leckageverluste	80%	20%	16%
Häufigerer Filterwechsel	40%	2%	0,8%
1: Anwendbarkeit = Anteil der Anlagen in Prozent, bei denen die Maßnahmen anwendbar und rentabel sind			

2.2.2.3 Peripherie dritter Ordnung

Die peripheren Systeme der dritten Ordnung zeichnen sich durch eine Unabhängigkeit von den Hauptprozessen aus [Schenk/Wirth 2004]. Ihre wichtigste Aufgabe besteht nach Müller in der Verwaltung oder in sozialen Zwecken [Müller et al. 2009]. Im Rahmen dieser Arbeit wird hier das Beleuchtungssystem sowie das Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystem betrachtet (vgl. Kapitel 1):

Beleuchtung

Unter Beleuchtung bzw. Beleuchtungssystemen versteht man im Allgemeinen die „*Bündelung des Lichtstroms [...] zur gleichmäßigen Ausleuchtung von Flächen*“ [Haferkorn 2003]. Bei der Auslegung und Gestaltung von energieeffizienten Beleuchtungssystemen ist darauf zu achten, dass Mindestanforderungen bzw. lichttechnische Gütemerkmale, wie beispielsweise die Nennbeleuchtungsstärke der Beleuchtung eingehalten werden [DIN EN 12464-1], [DIN V 18599-4], [Rattunde 1980]. Die Auswahl der zur Verwendung kommenden Leuchtmittel hängt im starken Maße von den örtlichen Gegebenheiten ab [ASR 2011].

Die Beleuchtung macht in der Industrie nur einen kleinen Teil des Endenergieverbrauchs aus [Müller et al. 2009], (Abbildung 1-3). Trotzdem ist eine Berücksichtigung sinnvoll, da eine Optimierung im Vergleich zur Optimierung der anderen peripheren Systeme meist mit geringem Aufwand durchgeführt werden kann.

Die Berechnung des Energiebedarfs für die Beleuchtung kann nach dem Tabellenverfahren der *Vornorm DIN V 18599-4* erfolgen [DIN V 18599-4]. Hiernach lässt sich der Energiebedarf z.B. für stabförmige Leuchtstoffröhren mit elektronischen Vorschaltgeräten in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen berechnen. Die folgenden Formeln machen deutlich, dass eine Vielzahl von Einflussfaktoren einen Einfluss auf die formal-mathematische Berechnung hat. Der größte Einfluss geht von der Versorgung der betrachteten Bereiche mit Tageslicht sowie der Wahl des Beleuchtungsmittels aus [DIN V 18599-4]:

$$W_{Bel.} = \sum_{n=1}^N F_{t,n} \times \sum_{i=1}^I W_{Bel.,n,i} \quad \text{Formel 2-6}$$

mit:

$$W_{Bel.,n,i} = W_{Bel.,3,i} \times \left[\begin{array}{l} A_{TL,i} \times (t_{eff,Tag,TL,i} + t_{eff,Nacht,i}) \\ + A_{KTL,i} \times (t_{eff,Tag,KTL,i} + t_{eff,Nacht,i}) \end{array} \right] \quad \text{Formel 2-7}$$

und:

$$W_{Bel.,3,i} = \omega_{el.Bel.,i,lx} \times \bar{E}_m \times k_A \times k_L \times k_R \quad \text{Formel 2-8}$$

Optimierungspotentiale im Bereich der Beleuchtung können durch intelligente Beleuchtungskonzepte wie z.B. der Installation von Präsenzmeldern oder Dämmerungssensoren erzielt werden. Dadurch kann eine bedarfsgerechte Beleuchtung umgesetzt werden. Auch die Installation moderner Beleuchtungssysteme wie z.B. Hochdruckleuchtmittel mit elektronischen Vorschaltgeräten können zu großen Einsparungen führen. [Dena 2010]

Bei einer Neuplanung ist auf die Versorgung der Räumlichkeiten mit Tageslicht zu achten, wodurch erhebliche Einsparpotentiale realisierbar sind.

Heizung, Lüftung, Klimatisierung (HLK)

Anlagen zur Heizung, Lüftung und Klimatisierung sind in ihrer konstruktiven Ausprägung äußerst vielfältig. Aus diesem Grund werden sie im Folgenden in Teilfunktionalitäten beschrieben. Die Aufteilung erfolgt dabei in

- Heizwärme- und Kühlbedarf
- Lüftung
- Trinkwassererwärmung

Um den Heizwärme- und Kühlbedarf eines Systems zu bestimmen, sind sowohl bautechnische als auch anlagentechnische Eigenschaften sowie Anforderungen an die Nutzung zu berücksichtigen [DIN V 18559-2]. Industrieunternehmen verwenden zur Deckung des Raumwärmebedarfs sowie für Prozesswärme häufig Warm- und Heißwasser bis 120° C [Schmid 2004]. Unter Prozesswärme ist hierbei zugeführte thermische Energie zu verstehen, die dazu verwendet wird, Phasenübergänge, Druck- oder Volumenänderungen herbeizuführen. Außerdem kann Prozesswärme zur Trocknung verwendet werden [Müller et a. 2009], [Schmid 2004]. Insbesondere im Maschinenbau liegt der Anteil der Raum- und Prozesswärme bis zu einer Temperatur von 100°C deutlich über 60% [Schäfer 2008].

Ein Bilanzierungsverfahren für eine allgemeingültige, ingenieurmäßige Energiebedarfsbilanzierung von Gebäuden ist in der Vornorm DIN V 18599 Teil 1 und 2 beschrieben. Hierbei können Randbedingungen frei gewählt werden, um z.B. einen Abgleich zwischen Energiebedarf und Energieverbrauch (Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich) durchzuführen. [DIN V 18599-1], [DIN V 18599-2]

Die nachfolgenden Formeln beschreiben eine Möglichkeit zur Berechnung des Energiebedarfs für die Nutzwärme (Heizwärme) und Nutzkälte (aus DIN V 18599-2), für die Luftaufbereitung (aus DIN V 18599-4 und -7) sowie für die Trinkwasseraufbereitung (aus DIN V18599-8).

Für den Heizwärme- und Kühlbedarf ergeben sich nach [DIN V 18599-2]:

$$W_{therm,Heiz} = W_{therm,Senke} + W_{therm,Anl.} + W_{therm,Ger.} + W_{therm,Bel.} - \Delta W_{therm,Kühl} \quad \text{Formel 2-9}$$

$$W_{therm,Kühl} = (1 - \eta_{Quelle}) \times (W_{therm,Anl.} + W_{therm,Ger.} + W_{therm,Bel.}) \quad \text{Formel 2-10}$$

Der Energiebedarf für die Luftförderung kann für Anlagen mit zeit- oder nutzungsabhängiger Steuerung des Volumenstroms nach folgender Gleichung berechnet werden. Sie erfolgt im Allgemeinen durch Zuluft- sowie Abluftventilatoren, die elektrische Leistung aufnehmen [DIN V 18599-3]:

$$W_{L\u00fcftung} = \sum_p t_{L\u00fcftung} (P_{el,Luft,ZUL,p} + P_{el,Luft,ABL,p}) \quad \text{Formel 2-11}$$

Die Trinkwassererw\u00e4rmung dient insbesondere der Versorgung von sanit\u00e4ren und sozialen Einrichtungen. Der Energiebedarf f\u00fcr die Trinkwassererw\u00e4rmung berechnet sich nach folgender Formel [DIN V18599-8]:

$$W_{Wasserw\u00e4rmung} = \rho \times c \times V_w \times (\vartheta_{w,m} - \vartheta_k) \quad \text{Formel 2-12}$$

Zentrale Optimierungskriterien im Bereich der HLK-Versorgungssysteme stellen ein strukturiertes Luftf\u00fchrungskonzept, sowie die Wahl eines geeigneten Heizkonzepts dar. So ist z.B. die Abluft an der Entstehungsstelle aufzunehmen und abzuf\u00fchren. Dabei ist es m\u00f6glich, auskoppelbare Abw\u00e4rme einer W\u00e4rmer\u00fcckgewinnung zuzuf\u00fchren. Auch die Bauart der Heizungsanlage ist bereits w\u00e4hrend der Anschaffung auf sp\u00e4tere Betriebskosten hin zu untersuchen. [L\u00f6ffler 2003] Eine bedarfsgerechte, geregelte Heizung und L\u00fcftung mit Temperaturabsenkung stellt einen weiteren gro\u00dfen Faktor zur Energieeinsparung dar.

Fazit: Modelle zur Beschreibung der Fabrik

Die peripheren Bereiche einer Fabrik sind f\u00fcr die energetische Betrachtung von herausragender Bedeutung, da sie f\u00fcr einen erheblichen Teil des Energiebedarfs verantwortlich sein k\u00f6nnen. Somit ist es zwingend erforderlich, diese bei der energetischen Betrachtung mit einzubeziehen. Es wurden die in Kapitel 1 identifizierten Systeme formal-mathematisch beschrieben und ihrer peripheren Ordnung zugeteilt. Die Zuteilung eignet sich f\u00fcr die Ermittlung der Abh\u00e4ngigkeiten zwischen den Prozessen der Hauptressourcen und der peripheren Systeme. Die formal-mathematische Beschreibung dient der Bestimmung der Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch der jeweiligen Systeme, die wiederum die Grundlage f\u00fcr eine energetische Planung und Optimierung bilden.

Im Bezug zur Zielsetzung dieser Arbeit werden bei der Ber\u00fccksichtigung der peripheren Systeme nur elektrische Verbraucher als Energieanwender in der spanenden Fertigung in Betracht gezogen. Andere Bereitstellungsformen von Energie k\u00f6nnen unter Einbeziehung der Energietr\u00e4ger durch Umrechnungsfaktoren ber\u00fccksichtigt werden (vgl. Tabelle 7-1 im Anhang).

2.3 Ausgew\u00e4hlte T\u00e4tigkeiten der Arbeitsvorbereitung

Die Arbeitsvorbereitung (AV) nimmt eine zentrale Stellung im Unternehmen ein, da sie zwischen der Konstruktion und der Herstellung von Produkten steht [Wiendahl 2010]. Die Gliederung der

AV sowie die Strukturierung in einzelne Teilaufgaben wurden grundlegend von *Wiendahl* und *Eversheim* geprägt.

Es wird zwischen der auftragsunabhängigen Arbeitsplanung und der auftragsabhängigen Arbeitssteuerung, welche die Teilgebiete Produktionssteuerung und Produktionsplanung beinhaltet, unterscheiden. Während bei der Arbeitsplanung alle einmaligen Maßnahmen berücksichtigt werden, sind in der Arbeitssteuerung alle Maßnahmen enthalten, die für die konkrete Auftragsabwicklung erforderlich sind. [Wiendahl 1997] In der Planungsphase wird ein Großteil des späteren Energiebedarfs einer Produktion festgelegt, während die Energie in der Betriebsphase verbraucht wird [Abele et al. 2012]. Daraus resultiert, dass die Arbeitsvorbereitung bei der energetischen Planung, Bewertung und Optimierung eine wichtige Rolle einnimmt.

2.3.1 Arbeitsplanerstellung und Operationsplanung

Die Arbeitsplanung umfasst nach *Wiendahl* alle einmaligen Planungstätigkeiten, „*welche unter ständiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit die fertigungsgerechte Gestaltung eines Erzeugnisses [...] sichern*“ [Wiendahl 2010]. Sie kann in kurzfristige, mittelfristige und langfristige Tätigkeiten unterteilt werden (vgl. Abbildung 2-7). Der Fokus der Arbeitsplanung im Rahmen dieser Arbeit liegt auf den kurzfristigen Tätigkeiten der Arbeitsablaufplanung, insbesondere der Arbeitsplanerstellung sowie der Operationsplanung, welche die Grundlage für die NC-Programmierung darstellt [Eversheim 2002]. In den Tätigkeiten der Arbeitsplanung wird ein Großteil des späteren energetischen Verhaltens der Produktion festgelegt [Abele et al. 2012].

Horizont	Aufgabe	Beschreibung
Kurzfristig	Stücklistenverarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellen von Fertigungs- und Montagestücklisten aus Konstruktionsstücklisten
	Arbeitsplanerstellung	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung von Arbeitsvorgangsfolge, Betriebseinrichtungen und Vorgabezeit
	NC-Programmierung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellen von Steuerprogrammen für numerisch gesteuerte Maschinen und Handhabungsgeräte
Mittelfristig	Fertigungsmittelplanung	<ul style="list-style-type: none"> Konstruktion und Fertigung spezieller Fertigungseinrichtung und Prüfmittel
	Planungsvorbereitung	<ul style="list-style-type: none"> Beratung von Konstruktion und Produktion
	Kostenplanung	<ul style="list-style-type: none"> Vorkalkulation und Entscheidungsvorbereitung für Eigenfertigung oder Fremdvergabe
	Qualitätssicherung	<ul style="list-style-type: none"> Erstellen von Prüfplänen und Beratung bei der Qualitätsplanung, Unterstützung der Zertifizierung
Langfristig	Materialplanung	<ul style="list-style-type: none"> Planung der am Lager vorzuhaltenden Materialsorten; Lieferantenbewertung und –auswahl
	Methodenplanung	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklung neuer umweltgerechter Verfahren, Methoden und Hilfsmittel zur Fertigung und Montage
	Investitions- und Fabrikplanung	<ul style="list-style-type: none"> Planung von Fertigungsmitteln, Anlagen und Produktionsbereichen einschließlich der Arbeitsplatzgestaltung


 = Fokus im Rahmen dieser Arbeit

Abbildung 2-7: Aufgaben der Arbeitsplanung (in Anlehnung an [Wiendahl 2010])

Die Arbeitsplanerstellung kann in verschiedene Phasen unterteilt werden, die im Folgenden detailliert betrachtet werden. Außerdem wird die Operationsplanung als weitere kurzfristige Aufgabe der Arbeitsplanung weiter detailliert (vgl. Abbildung 2-8):



Abbildung 2-8: Phasen der Arbeitsplanung und der Operationsplanung (in Anlehnung an [Eversheim 2002], [Wiendahl 2010])

Rohmaterialbestimmung

Bei der Rohmaterialbereitstellung werden verschiedene alternative Ausgangsformen für den zu verarbeitenden Werkstoff festgelegt. Wichtige Einflussgrößen bei der Entscheidung sind insbesondere die geplante Stückzahl und die Analyse der beherrschten Verfahren. Diese Entscheidung hat wiederum einen direkten Einfluss auf die weiteren Schritte der Arbeitsplanung (vgl. Abbildung 2-8). Bereits in diesem Schritt ist eine Verfahrensanalyse erforderlich, bei der der gesamte Verfahrensablauf grob durchgeplant wird. [Wiendahl 2010]

Daraus folgt, dass die Arbeitsplanung nicht als strenge Abfolge von sequenziellen Teilaufgaben verstanden werden kann, sondern als integrierte Planungstätigkeit aufgefasst werden muss.

Arbeitsvorgangsfolgenermittlung

Die Arbeitsvorgangsfolgenermittlung kann weiter unterteilt werden in Fertigungsverfahrensauswahl und Prozessfolgenermittlung. In dieser Phase der Arbeitsplanung werden sowohl geeignete Fertigungsverfahren ausgewählt als auch miteinander verglichen, da häufig alternative technische Verfahren zur Verfügung stehen. Im darauf aufbauenden Schritt wird die Folge der Arbeitsschritte festgelegt, die zur schrittweisen Erzeugung des Fertigteils erforderlich sind. [Wiendahl 2010], [Eversheim 2002]

Fertigungsmittelzuordnung

Eine grobe Fertigungsmittelauswahl wird bereits beim Schritt der Fertigungsverfahrensauswahl vorgenommen. Die Fertigungsmittelzuordnung dient der konkreten Ressourcenauswahl im Unternehmen. Häufig stehen mehrere Maschinen zur Verfügung, die prinzipiell das gleiche Verfahren beherrschen, jedoch in den technologischen Parametern wie z.B. Hauptspindelleistung, Automatisierungsgrad oder der elektrischen Leistungsaufnahme voneinander abweichen. Ziel der Fertigungsmittelzuordnung ist es, den gewählten Arbeitsvorgängen konkrete Ressourcen zuzuordnen. [Wiendahl 2010]

Vorgabezeitermittlung

Der Energieverbrauch einer Ressource hängt direkt von der Leistungsaufnahme und der Zeit, in der die Leistung benötigt wird, ab (vgl. Kapitel 2.1). Daraus folgt, dass Kenntnisse über die Belegungszeiten für eine energetische Betrachtung sehr wichtig sind.

Die Kenntnis der Vorgabezeiten ist zudem eine wichtige Grundlage für die Termin- und Kapazitätsplanung sowie für die Investitionsplanung [Wiendahl 2010]. Eine standardisierte und weit verbreitete Systematik zur Gliederung der Belegungszeiten stellen die Vorgabezeiten nach REFA dar (vgl. Abbildung 2-9). [Binner 2005], [REFA 1973]

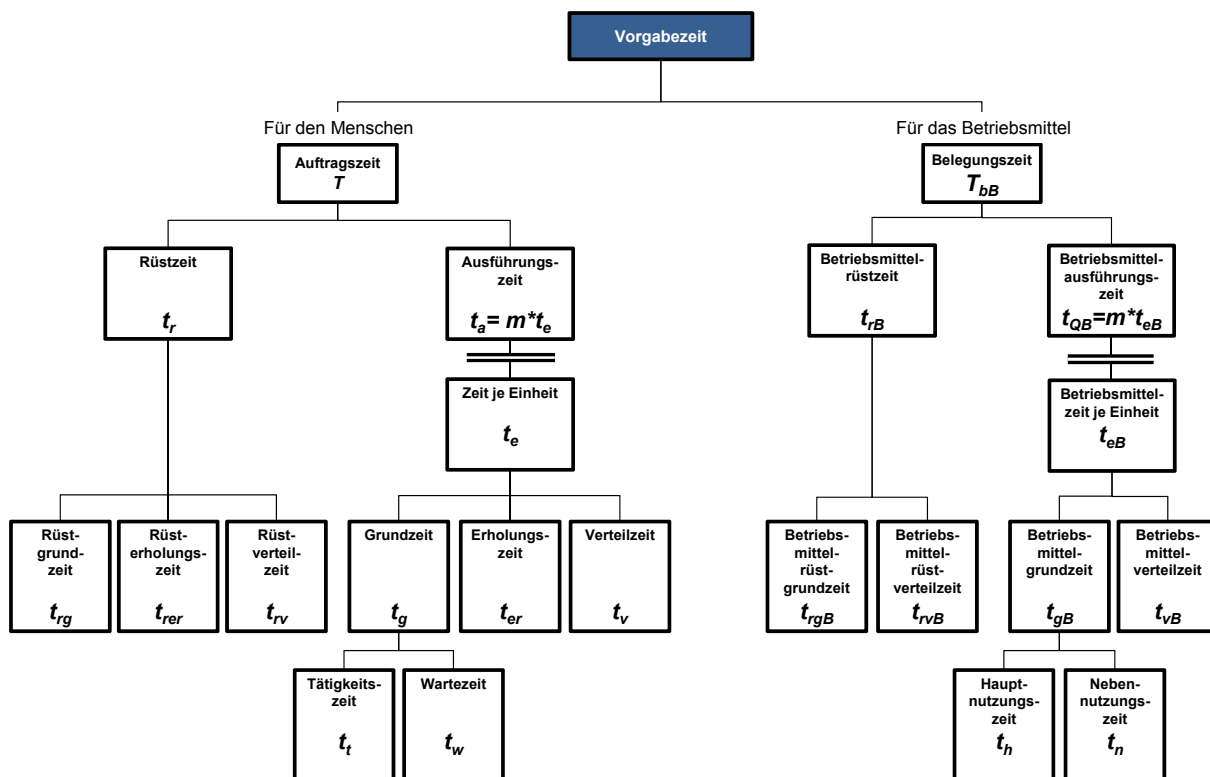


Abbildung 2-9: Systematik der Vorgabezeiten nach REFA [Binner 2005]

Vorgabezeiten nach REFA sind definiert als „*Soll-Zeiten für [...] Betriebsmittel, um Arbeitsaufgaben in einem Arbeitssystem durchzuführen*“. Vorgabezeiten beziehen sich hierbei immer auf Arbeitssysteme und können als „*Durchführungszeiten*“ verwendet werden. [REFA 1991] Die Vorteile in der Zeitermittlung nach REFA bestehen in einer guten Reproduzierbarkeit der Zeitanteile. Somit sind sie für die Bildung von Kennzahlen (vgl. Kapitel 2.4) geeignet. Darüber hinaus eignen sich die ermittelten Zeitdaten nach REFA für inner- und außerbetriebliche Benchmarks. [Westkämper 2006]

Operationsplanung

Die Operationsplanung stellt das Bindeglied zwischen dem Arbeitsplan und der NC-Programmierung dar und nimmt heute eine wichtige Stellung als kurzfristige Aufgabe der Arbeitsplanung ein (vgl. Abbildung 2-8). Es handelt sich um die Feinplanung der Arbeitsvorgänge. Das Ergebnis der Operationsplanung ist somit die Zurverfügungstellung aller benötigten Informationen, die für die Generierung des NC-Codes erforderlich sind. Je nach Komplexität der Bauteile kann die Operationsplanung dezentral vom Werker oder zentral vom Planer durchgeführt werden. [Eversheim 2002]

Eingangsgrößen für die Operationsplanung sind geometrische und technologische Daten des Werkstücks, die in der Konstruktion festgelegt werden. Zusätzlich werden aus der vorgelagerten Arbeitsplanerstellung Informationen über Ausgangs- und Zwischenzustände des Werkstücks sowie Informationen über Spannflächen und das Zerspanvolumen benötigt. Die Operationsplanung kann nach *Eversheim* in folgende Teilschritte untergliedert werden (Abbildung 2-8) [Eversheim 2002]:

- **Spannlagenbestimmung und Spannmittelplanung**
Hierbei ist auf eine möglichst geringe Anzahl von Umspannvorgängen zu achten. Außerdem dürfen keine Spannungen in das Werkstück eingebracht werden.
- **Auswahl der Bearbeitungsbereiche / Operationsbestimmung**
Hierbei werden die Operationen, die aus dem Arbeitsplan und der Konstruktion grob vorgegeben sind, weiter detailliert. Bei Alternativen wird eine Auswahl nach wirtschaftlichen Aspekten getroffen.
- **Werkzeugbestimmung**
Die Werkzeugauswahl erfolgt in Abhängigkeit der gewählten Operationsbestimmung sowie der Einschränkungen im Bezug zur verwendeten Maschine.

- **Schnittstrategiebestimmung**

Die Schnittstrategiebestimmung erfolgt auf Basis der gewählten Operationen und Werkzeugen. Es werden die einzelnen Bearbeitungsbereiche detailliert geplant. Die Komplexität ist stark vom gewählten Verfahren abhängig.

- **Optimierung der Schnittwerte und der Operationsreihenfolge**

Hierbei sind Schnittwerte anhand von Katalogen, Datenbanken oder Erfahrungswissen optimal an die Bearbeitungsaufgabe anzupassen. Außerdem ist abschließend die vollständige Operationsreihenfolge festzulegen.

Dieses stufenweise Vorgehen führt zu einem aufgaben- und maschinenspezifischen NC-Programm, welches unter Berücksichtigung der technischen und organisatorischen Vorgaben die Bearbeitungsaufgabe wirtschaftlich bestmöglich erfüllt. [Eversheim 2002]

Häufig sind alternative Operationsfolgen möglich, die hinsichtlich ihres Energiebedarfs untersucht werden können.

2.3.2 Relevante Tätigkeiten in der Arbeitssteuerung

In der Arbeitssteuerung (auch Produktionsplanung und -steuerung (PPS) oder Auftragsmanagement genannt) werden alle Maßnahmen zusammengefasst, die für eine Auftragsabwicklung gemäß den Vorgaben aus der Arbeitsplanung erforderlich sind [Wiendahl 2010], [Wiendahl 2007].

Im Teilgebiet der Produktionsplanung werden alle auftragsabhängigen planerischen Funktionen subsummiert, das Teilgebiet der Arbeitssteuerung umfasst die auftragsabhängigen steuernden Funktionen (vgl. Abbildung 2-10).

Die Teilgebiete und Hauptfunktionen können auch anhand des Zeithorizonts gegliedert werden. Hierbei erfolgt eine Unterscheidung in langfristige, mittelfristige und kurzfristige Tätigkeiten. Unter Berücksichtigung der Zielsetzung dieser Arbeit wird die kurzfristige Funktion der Auftragsüberwachung und Teilfunktionalitäten der Auftragsveranlassung näher erläutert. Außerdem sind für die Planung des energetischen Verhaltens einer Fertigung Aspekte der Termin- und Kapazitätsplanung sowie der Datenverwaltung von Bedeutung.

Die Aufgabe der Termin- und Kapazitätsplanung liegt insbesondere in der fristgerechten Fertigstellung der Aufträge. In der Belastungsrechnung, die zum Abgleich kurzfristiger Schwankungen zwischen vorhandener Kapazität und Belastung dient, werden einzelne Arbeitsgänge entsprechend der verfügbaren Kapazität verschoben. Diese Kapazitätsterminierung kann zu wesentlichen Änderungen im energetischen Verhalten einer Produktion führen. Bei der Auftragsüberwachung im Rahmen

der Produktionssteuerung ist die Betriebsdatenerfassung von zentraler Bedeutung, da sie Rückmeldungen über den aktuellen Zustand der Produktion gibt. Diese Daten dienen z.B. dem Ermitteln des Auftragsfortschritts sowie der Bildung von Kennzahlen. [Wiendahl 2010] Zusätzlich werden die technischen Zustandsdaten der verwendeten Ressourcen erfasst und in Datenbanken hinterlegt (vgl. Kapitel 2.5.1) [Gienke/Kämpf 2007]. Sie können somit auch für die technische Anlagensteuerung verwendet werden [Müller/Krämer 2001].

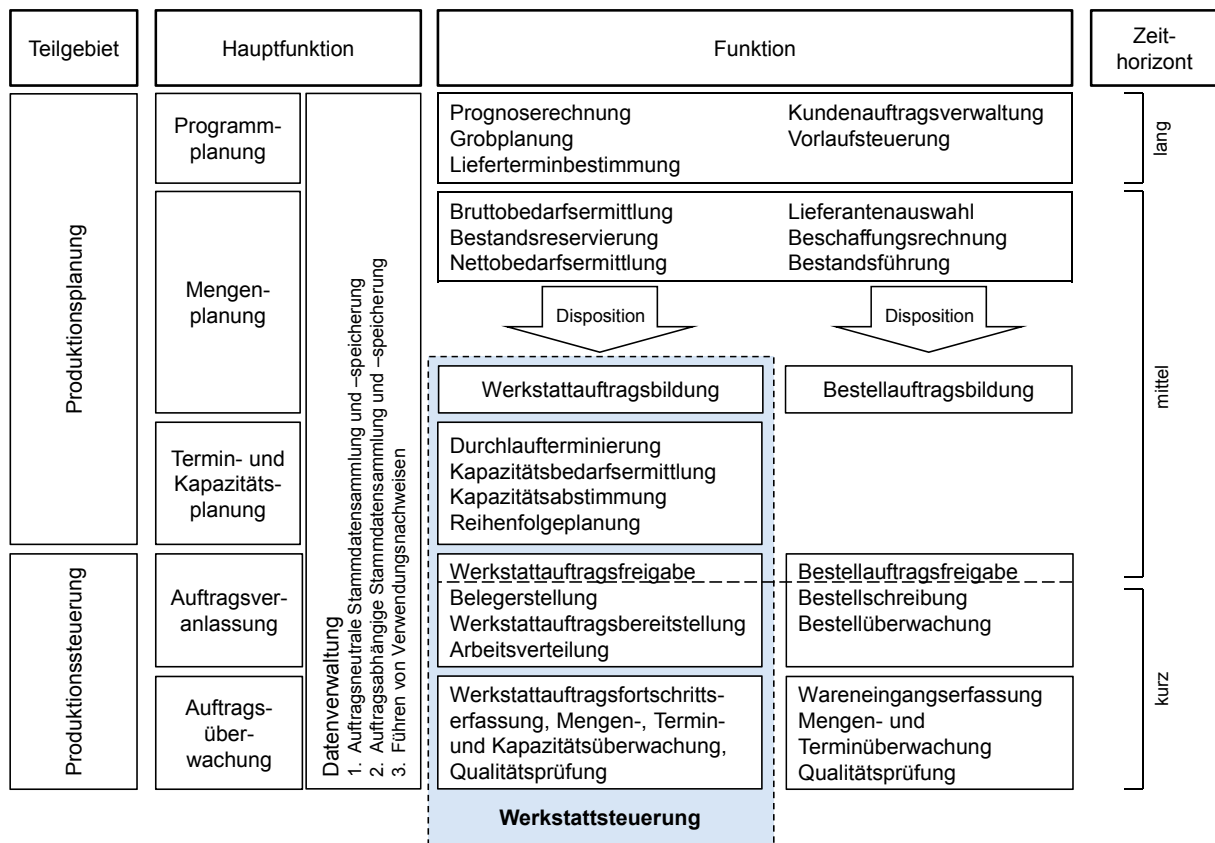


Abbildung 2-10: Teilgebiete und Funktionen der PPS (nach [Bornhäuser 2009] in Anlehnung an [Hackstein 1989])

Die Auftragsveranlassung fasst die Tätigkeiten zusammen, die unter Berücksichtigung von Störungen oder Terminverschiebungen für eine Auftragsdurchsetzung verantwortlich sind. Hierzu zählt auch die Belegungs- und Reihenfolgeplanung: In dieser Funktion werden die Auslastungen der einzelnen Ressourcen festgelegt und es kann eine Prioritätsregelsteuerung durchgeführt werden. [Wiendahl 2010]

Reinhart et al. definierten Handlungsfelder, die zu einer Reduktion des Energieverbrauchs in der PPS führen sollen. Hierzu zählen die Planung einer energieoptimalen Auftragsreihenfolge, die Auswahl der energetisch besten Ressource, die Glättung des Energieverbrauchs, die Kumulierung

von Puffer- und Leerlaufzeiten, die Auswahl einer energieoptimalen Losgröße sowie die Terminierung von Energieaufnahme und Abgabe. *Reinhart et al.* vertreten die Ansicht, dass die Untersuchung dieser Aspekte zu großen Einsparpotentialen beitragen können. [Reinhart et al. 2011]

Fazit: Arbeitsvorbereitung

In der Arbeitsvorbereitung werden wesentliche Entscheidungen getroffen, die einen großen Einfluss auf das energetische Verhalten der Produktion haben. Bei der Arbeitsplanung wird durch die Operationsplanung sowie die Ressourcenauswahl und die Ermittlung von Vorgabezeiten das spätere Verhalten der Produktion stark beeinflusst. Viele dieser Entscheidungen werden getroffen, ohne dass spätere Auswirkungen bewusst wahrgenommen werden.

Im Bereich der Arbeitssteuerung ist es insbesondere wichtig, permanent den aktuellen Status des Systems zu kennen. Hierbei unterstützt die Betriebsdatenerfassung. Auch die Termin- und Kapazitätsplanung kann ein erhebliches energetisches Einsparpotential bieten, welches in der Praxis nicht genutzt wird, da hierfür eine geeignete Methodik fehlt, die bei der Bewertung verschiedener Szenarien und der anschließenden Ableitung geeigneter Maßnahmen unterstützt.

2.4 Kennzahlensysteme und Kennzahlen

Der Begriff „*Kennzahlen*“ wird in der Literatur nicht eindeutig verwendet. Sie stellen jedoch allgemein ein geeignetes Mittel dar, um Daten in geeigneter Weise zu aggregieren und zur Planung, Steuerung oder Kontrolle zur Verfügung zu stellen [Meyer 2008], [BMU 2001]. Das Controlling durch Kennzahlen basiert auf dem Ansatz des „kybernetischen Regelkreises“ (vgl. Abbildung 2-11):

Dabei sind Führungsgrößen (Sollgrößen „ w “) übergeordnete Unternehmensziele, wie z.B. die Durchlaufzeit oder die Termintreue. Es können jedoch auch andere Zielgrößen wie energetische Effizienzgrößen als Führungsgröße definiert werden. Ist-Größen werden durch ein gewähltes Kennzahlensystem oder durch eine Kennzahl ermittelt und als Rückführgröße („ r “) zur Verfügung gestellt. Auf Basis eines darauf folgenden Soll-Ist-Vergleichs können geeignete Maßnahmen identifiziert und umgesetzt werden (vgl. Abbildung 2-11). [Herrmann 2010]

Grundsätzlich können Kennzahlen in absolute und relative Kennzahlen eingeteilt werden, außerdem wird häufig zwischen monetären und nicht-monetären Kennzahlen unterschieden. [Horvath 2009], [Küpper 2005] Von Kennzahlensystemen spricht man, wenn mindestens zwei Kennzahlen zueinander in einem sachlichen Bezug stehen und auf ein Gesamtziel ausgerichtet sind [Loew et al. 1997], [Weismann 2008].

Hierbei ist zwischen

- Rechensystemen und
- Ordnungssystemen

zu unterscheiden [Horvath 2009]. Rechensysteme gehen von Spitzenkennzahlen aus, die mathematisch weiter zerlegt werden können [Mutscheller 1996]. In Ordnungssystemen werden Kennzahlen hingegen nach reinen sachlogischen Zusammenhängen miteinander in Bezug gesetzt [Preißler 2008].

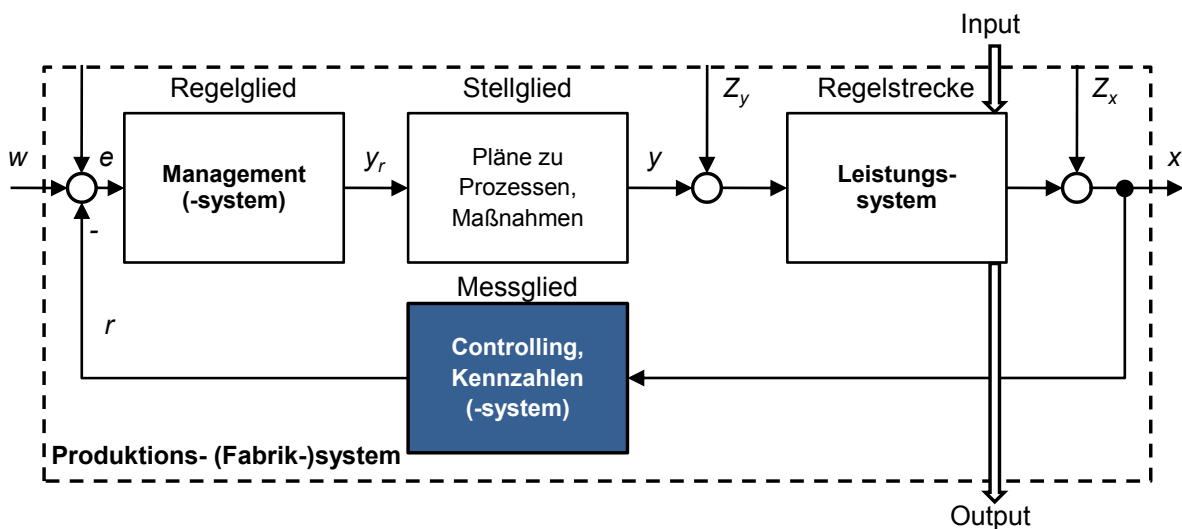


Abbildung 2-11: Kennzahlen im kybernetischen Regelkreis (in Anlehnung an [Baetge 1974], [Dyckhoff/Spengler 2007], [Herrmann 2010])

In der Betriebswirtschaft werden Kennzahlen als typische Controlling-Werkzeuge verstanden, da sie zur adäquaten Informationsversorgung des Managements beitragen. Sie können sowohl im innerbetrieblichen als auch im betriebsübergreifenden Rahmen einen Vergleich von zuvor definierten Größen ermöglichen und sowohl zur Analyse als auch zur Steuerung verwendet werden. Bei der Verwendung als Steuerungsinstrument wird zwischen „Kontrolle“ und „Planung“ unterschieden. Die Kontrolle dient insbesondere dem Soll-Ist-Vergleich bestehender Systeme, während die Verwendung in der Planung auf einer Kennwertvorgabe beruht (vgl. Abbildung 2-12). [Bauer 1988], [Horvath 2009]

Die Grundvoraussetzung für einen Soll-Ist-Vergleich bildet die Definition eines Referenzsystems, welches die erforderlichen Soll-Werte zur Verfügung stellt.

Nach Aussagen von *Hallay und Pfriem* sowie von *Hopfenbeck und Jasch* sind Kennzahlensysteme mit 10 bis 20 Kennzahlen ausreichend, um Systeme vollständig beschreiben zu können [Hallay 1992], [Hallay/Pfriem 1992], [Hopfenbeck/Jasch 1993].

Um Kennzahlen und Kennzahlensysteme auf ihre Eignung hin beurteilen zu können, ist es erforderlich, Kriterien festzulegen. In der Literatur wird eine Vielzahl von zu berücksichtigenden Kriterien genannt. Eine vollständige, allgemeingültige Liste ist jedoch nicht existent, da die Kennzahlenauswahl situationsabhängig getroffen werden muss.

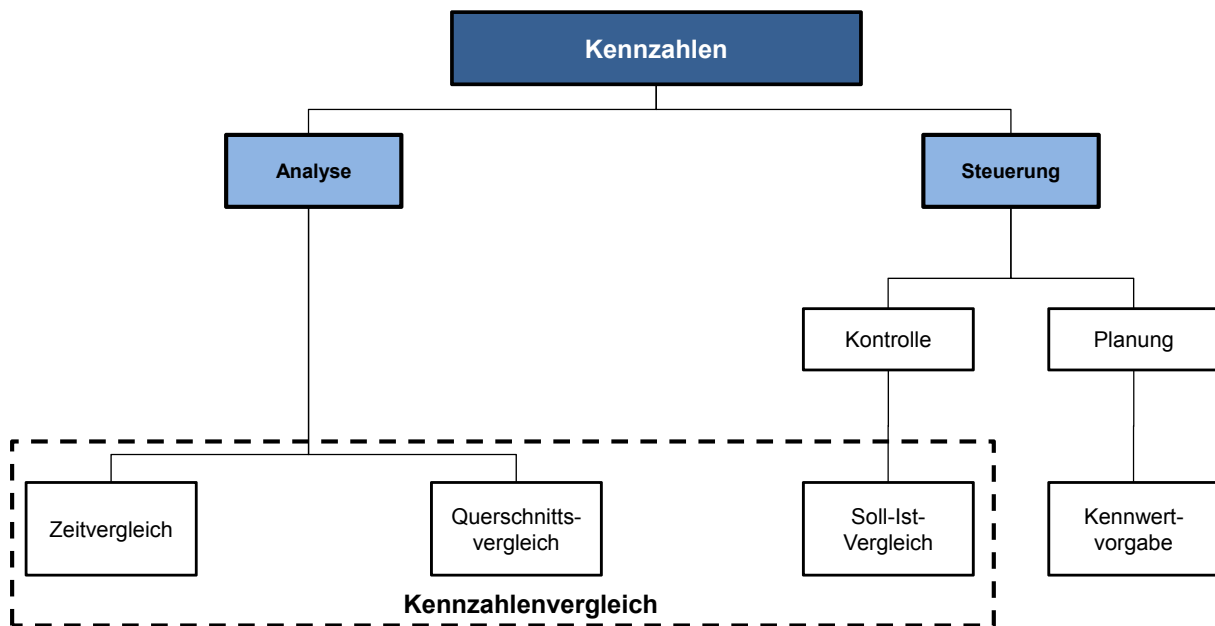


Abbildung 2-12: Einteilung der Verwendung von Kennzahlen (nach [Bauer 1988])

Scheermesser ordnet unterschiedliche bestehende wissenschaftliche Ansätze für Kennzahlen nach den sechs Bewertungskriterien Kosten, Zeit, Qualität, Konformität, Prozessperformance, Zufriedenheit und Wissen. Sie verfolgt damit das Ziel, durch „*die Erfassung verschiedener Aspekte [...] das Gesamturteil eines Geschäftsprozesses aus mehreren Perspektiven in einer umfassenden, multi-kriteriellen Bewertung zusammenzuführen*“. [Scheermesser 2003]

Da es meist schwierig ist, schon zur Beginn einer Analyse alle relevanten Kennzahlen zu ermitteln, sollte der Kreis in einem ersten Schritt etwas weiter gezogen werden. Dies stellt sicher, dass man alle relevanten Kennzahlen erfasst. [Küpper 2005]

Daraus resultiert, dass sich allgemeine Kriterien aus verschiedenen Quellen für die Bewertung von Kennzahlen im Rahmen ableiten lassen (vgl. Tabelle 7-2 im Anhang, vgl. auch [Günther/Berger 2001]).

2.4.1 Kennzahlensysteme

Im Bereich der Kennzahlensysteme sind insbesondere die betriebswirtschaftlichen Kennzahlensysteme weit verbreitet. Der bekannteste Vertreter stellt das bereits 1919 entwickelte und ständig verbesserte „DuPont-System of Financial Control“ dar. [Stahle 1969], [Meyer 2008], [Horvath 2009] Betriebswirtschaftliche Kennzahlensysteme weisen meist eine finanzwirtschaftliche, monetäre Ausrichtung auf. Eine vollständige Formulierung der Zielerreichung auf Basis rein monetärer Größen stellt aus der Sicht mehrerer Autoren für die Unternehmensführung ein ungeeignetes Instrument dar, da der finanzielle Erfolg häufig ein Ergebnis vieler vor- und nachgelagerter Ereignisse und Aktivitäten ist [Westkämper/Zahn 2009], [Macharzina/Wolf 2010]. Die ökonomischen Ziele bilden zwar die Grundlage jedes Wirtschaftsunternehmens, um jedoch der steigenden Bedeutung des nachhaltigen Handelns gerecht zu werden, müssen die eingesetzten Ressourcen bezüglich ihres energetischen Verhaltens explizit mit einbezogen werden. Die implizite Berücksichtigung der Energie als eine rein monetäre Größe ist für den Ansatz im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend. Um diese Defizite zu beheben, existiert in der Literatur eine Vielzahl von Umweltkennzahlensystemen, die neben den ökonomischen auch ökologische Aspekte berücksichtigen:

Umweltkennzahlensysteme können dazu dienen, bei der Beurteilung der ökologischen Effizienz oder Effektivität von Unternehmen zu unterstützen. Im Gegensatz zu einem Umweltmanagementsystem dienen Kennzahlensysteme insbesondere dem Controlling zuvor festgelegter Aspekte des betrieblichen Umweltmanagements. Die Definition des Umweltkennzahlensystems ist folglich enger gefasst. [DIN EN ISO 14001], [Hallay/Pfriem 1992]

Der Begriff der Umweltkennzahlen und Umweltkennzahlensysteme ist in der Literatur mit einer Vielzahl von verschiedenen Begriffen belegt, häufig wird der Begriff des „ökologieorientierten Controllings“ [Günther 1994], [Beuermann et al. 1995], des „ökologieorientierten Kennzahlensystems“ [Strobel 1992], des „Umwelt-Indikatorensystems“ [BMU 2007], des „environmental Performance Indicators“ [DIN EN ISO 14031] oder als Teil des „ökologischen Controllings“ [Zwingel 1997] bezeichnet (weitere Benennungen vgl. [Günther/Berger 2001]). In Anlehnung an die Definition von „Kennzahlen“ und „Kennzahlensystemen“ werden unter dem Begriff des Umweltkennzahlensystems im Rahmen dieser Arbeit quantitativ messbare Größen verstanden, die Aufschluss über den ökologischen Status des Betrachtungsraums geben. In der Literatur existiert eine Vielzahl von Umweltkennzahlen und –systemen [Günther/Berger 2001].

Bezug nehmend auf die Zielsetzung dieser Arbeit kann festgestellt werden, dass sich Umweltkennzahlensysteme zur Bewertung von Produktionsszenarien und zur anschließenden Maßnahmenablei-

tung nur bedingt eigenen. Sie lassen jedoch Aussagen zur Energieeffizienz zu. Außerdem ist es möglich, auch die peripheren Systeme zumindest grob zu berücksichtigen. In sämtlichen Umweltkennzahlensystemen sind die Stoffströme und Emissionen sehr stark vertreten, die Energie nimmt dabei nur einen Teil der Kennzahlen ein. Dadurch ist die Detaillierung des Teilaspekts „Energie“, auf den die vorliegende Arbeit fokussiert, nicht in ausreichender Form gegeben. Sie eignen sich jedoch, um die Energie- und Stoffströme in einer Fabrik grob darzustellen, da Sie auf die Bilanzgrenze Fabrik angewandt werden können. Somit liegt die Erfassung der benötigten Daten vollständig in der Verantwortung des Unternehmens.

Bei der Mehrzahl der existierenden Kennzahlensysteme handelt es sich um Ordnungssysteme. Das heißt, es findet keine mathematische Verknüpfung statt. Die Verknüpfung erfolgt stattdessen auf Basis eines rein sachlogischen Zusammenhangs. Dem sich daraus ergebenden Vorteil der höheren Flexibilität von Ordnungssystemen steht der wesentliche Nachteil der mangelnden quantitativen Belegbarkeit der Zusammenhänge und Ergebnisse gegenüber. Eine Analyse durch Ursache-Wirkungszusammenhänge ist somit nicht oder nur schwer möglich.

2.4.2 Kennzahlen

Neben Kennzahlensystemen existiert in der Literatur eine große Anzahl von einzelnen Kennzahlen, die eine Aussage über den Zustand des betrachteten Systems z.B. im Bezug auf den Energieverbrauch oder die Performance der Produktion erlauben. Diese lassen sich zu einem Kennzahlensystem zusammenführen. Sie werden im nachfolgenden Abschnitt detailliert untersucht:

Wirkungsgrad/Nutzungsgrad

VDI definiert den Wirkungsgrad als das Verhältnis aus der nutzbaren abgegebenen Energie und der zugeführten Energie [VDI 4661]. Das Problem bei der Bewertung des Wirkungsgrades liegt darin, dass er nicht an allen Betriebspunkten gleich ist und es häufig nicht möglich ist, Anlagen permanent am optimalen theoretischen Betriebspunkt zu betreiben. Ein angegebener Wirkungsgrad bezieht sich somit auf einen bestimmten Betriebspunkt der Anlage, welcher nicht immer vorherrscht. Die Alternative hierzu stellt die Ermittlung des Nutzungsgrades dar. Dieser wird analog zum Wirkungsgrad bestimmt, allerdings werden sowohl für die nutzbare Leistung als auch für die zugeführte Leistung periodenbezogene Summen wie z.B. der Jahresverbrauch und die Jahresnutzenergie eingesetzt. Somit wird durch die Ermittlung des Nutzungsgrades die Ungenauigkeit der Wirkungsgradbestimmung behoben. [Müller et al. 2009], [Schieferdecker et al. 2006]

Die Formel für den Wirkungsgrad bzw. Nutzungsgrad lautet:

$$\eta_{wirk} = \eta_{nutz} = \frac{W_{Nutz}}{W_{zu}} \quad \text{Formel 2-13}$$

Neben dem energetischen Wirkungs- und Nutzungsgrad kann auch der exergetische Wirkungs- und Nutzungsgrad bestimmt werden.

Spezifischer Energieverbrauch/Energiebedarf

Der spezifische Energieverbrauch stellt eine der wichtigsten Kennzahlen bei der energetischen Betrachtung von Maschinen und Anlagen dar und wird nach Formel 2-14 berechnet. Durch die Division des Energieverbrauchs durch eine beliebige Bezugsgröße ist eine vielseitige Verwendung möglich. Im industriellen Umfeld eignet sich der Bezug auf die produzierte Menge, die Zeit oder die Masse eines Bauteils. [VDI 4661], [Schieferdecker et al. 2006]

$$W_{spez} = \frac{\text{Energieverbrauch}}{\text{Bezugsgröße}} \quad \text{Formel 2-14}$$

Effizienzgrad

Der Effizienzgrad ergibt sich aus dem Quotient von einem Referenzwert und dem spezifischen Energieverbrauch [Lickefett et al. 2009]:

$$\text{Effizienzgrad} = \frac{W_{ref}}{W_{spez}} \quad \text{Formel 2-15}$$

Der spezifische Energieverbrauch kann hierbei nach Formel 2-14 berechnet werden. Die Bestimmung des Referenzwertes kann durch verschiedene Methoden und Ansätze bestimmt werden. Insbesondere sei hier auf die Ansätze nach *Kruska* und *Erlach* verwiesen (vgl. Kapitel 3) [Kruska 2002], [Erlach/Westkämper 2009].

Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der kumulierte Energieaufwand ist eine Kennzahl, mit der es ermöglicht wird, Produkte oder Dienstleistungen unter dem Aspekt der Ressourcenbelastung zu bewerten. Er bezieht sich auf den primärenergetischen Aufwand und berücksichtigt die Phasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes inklusive seinem Umfeld. [VDI 4600]

Kennzahlen für die Produktion

Neben den Energiekenngrößen ist es erforderlich, die klassischen Kennzahlen der Produktion zu berücksichtigen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Diese beziehen sich insbesondere auf das klassische Spannungsdreieck der Produktion, nach dem ein Unternehmen niedrige Kosten bei einer hohen Qualität und kurzen Entwicklungs- und Fertigungszeiten anstrebt. [Westkämper 2006] Diese Faktoren dürfen auch bei einer energetischen Betrachtung der Produktion nicht unberücksichtigt bleiben:

Die Durchlaufzeit (DLZ) ist nach *REFA* als Soll-Zeit definiert, die zur Erfüllung einer Aufgabe erforderlich ist. Sie setzt sich aus der planmäßigen Durchlaufzeit t_{pS} und einer Zusatzzeit t_{zuS} zusammen. Die planmäßige Durchlaufzeit t_{pS} kann weiter in Durchführungszeit t_{dS} und Zwischenzeit t_{zuS} aufgeteilt werden. Dabei kann die Durchführungszeit auf Basis der Arbeitsplandaten ermittelt werden. Somit sind nur noch die Zwischen- und Zusatzzeiten zu ermitteln. [REFA 1991] Es ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der Durchlaufzeit:

$$T_D = (t_{pS} + t_{zuS}) = t_{dS} + t_{zws} + t_{zuS} \quad \text{Formel 2-16}$$

Um eine hohe Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten, sind niedrige Bestände von zentraler Bedeutung. Hierbei ist es erforderlich, die optimalen Bestände zu ermitteln, da nach dem „*zweiten produktionslogistischen Grundgesetz*“ gilt, dass sich die Durchlaufzeit und Reichweite eines Systems aus dem Verhältnis von Bestand und Leistung ergibt. Weitere wichtige Einflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit sind eine hohe Termintreue und kurze Lieferzeiten. Hierbei ist die Abweichung der Ist-Termine zu den geplanten Soll-Terminen zu berechnen. [Nyhuis/Wiendahl 2003]

Die Overall Equipment Effectiveness (OEE) (auch Gesamtanlageneffektivität (GAE)) entstand ursprünglich im Total Productive Maintenance (TPM) und hat sich in der Produktion als wichtige Controlling-Kennzahl etabliert [Schuh et al. 2010]. Sie kann als Kennzahl angesehen werden, die den Grad der Prozesszuverlässigkeit einer Anlage beschreibt [Leischnig 2009].

Die OEE setzt sich aus den Eingangsgrößen Nutzungsgrad, Leistungsgrad und Qualitätsgrad zusammen und kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$OEE = \eta_{Nutz} \times \eta_{Leistung} \times \eta_{Qualität} \quad \text{Formel 2-17}$$

Die Kennzahl umfasst damit alle anlagenbedingten Verlustfaktoren während der Belegungszeit. Sie wird in Prozent angegeben. Jede Abweichung von 100% zeigt ein theoretisches Verbesserungspotential auf. [Niemann 2007]

Eine Variante der OEE ist die Kennzahl $O(EE)^2$, die versucht, die OEE und die Energieeffizienz zu einer Kennzahl zu verknüpfen (vgl. Kapitel 3) [Kampker et al. 2011].

Die nachfolgende Abbildung 2-13 stellt die beschriebenen Kennzahlen zusammenfassend in einer Übersicht dar und bewertet diese qualitativ anhand der aus der Literatur zusammengefassten Kriterien zur Bewertung von Kennzahlen (vgl. Tabelle 7-2 im Anhang und Kapitel 2.4).

Kennzahlen/Kriterien		Bewertungskriterien									Gesamtziel der Arbeit	Zieldimension	
		Reproduzierbarkeit, Vergleichbarkeit	Datenerfassung, Messaufwand, Angemessenheit	Aussagefähigkeit	Validität	Objektivität	Prognosemöglichkeit	wesentlich/eindeutig	adaptiv	Allgemeingültigkeit			
Kennzahlen	Energiekennzahlen	Effizienzgrad	++	0	++	++	++	++	++	++	++	++	ka.
		Wirkungsgrad/Nutzungsgrad	0/+	+/-	-/+	+	-/+	0/+	0/+	0	0	0/+	ka.
		Kumulierter Energieaufwand (KEA)	+	--	+	+	+	+	+	0	+	0	Energie
		spezifischer Energieverbrauch	++	+/-	++	++	++	++	++	++	+	++	Energie
		spezifischer Energieverbrauch der Nebenaggregate	++	+	++	++	++	++	++	++	0	++	Energie
		spez. Energieverbrauch Drucklufteinrichtung	++	+	++	++	++	++	++	++	0	++	Energie
		spez. Energieverbrauch Beleuchtung	++	+	++	++	++	++	++	+	0	++	Energie
		spez. Energieverbrauch HLK	++	0	++	++	++	++	++	+	0	++	Energie
	Sonstige	Qualitätsgrad	++	++	+	++	++	0	++	++	++	+	Qualität
		Anlagenverfügbarkeit	++	++	+	++	++	0	++	+	++	+	Zeit
		Kapazitätsauslastungsgrad	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	ka.
		Durchlaufzeit	++	+	++	++	++	+	++	++	++	++	Zeit
		Bestand	++	+	++	++	++	+	+	+	+	+	ka.
		Termintreue	++	++	++	++	++	+	++	+	++	++	Zeit
		OEE (GAE)	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	Zeit, Qualität

Legende: ++ = wird vollständig erfüllt; + = wird größtenteils erfüllt; 0 = keinen Einfluss; - = teilweise negative Beeinflussung; -- = stark negative Beeinflussung; (...) = Einschränkung, Kennzahl/Kriterium nur für unternehmensinterne (unter Verwendung einheitlicher Bezugsgrößen) Vergleiche geeignet.

Abbildung 2-13: Vergleich der Kennzahlen nach festgelegten Kriterien

Fazit: Kennzahlensysteme und Kennzahlen

Kennzahlensysteme erfüllen die Anforderungen im Rahmen dieser Arbeit nicht, da sowohl die Detaillierung als auch die Schwerpunktsetzung sowie die Möglichkeit zur Maßnahmenableitung nicht gegeben sind.

Die Analyse der einzelnen energetischen Kennzahlen hat hingegen gezeigt, dass diese sich generell eignen, um alternative Szenarien im Rahmen der gewählten Methodik zu bewerten. Es gilt jedoch zu beachten, dass neben der Energie auch weitere Kennzahlen berücksichtigt werden müssen. Die vorgestellten Kennzahlen erfüllen zum Großteil die erforderlichen Anforderungskriterien (vgl. Abbildung 2-13).

Die Untersuchung anhand der Kriterien bildet die Basis für die Entwicklung eines aufgabenspezifischen Kennzahlensystems im Rahmen dieser Arbeit (vgl. Kapitel 5.5).

2.5 Industrielle Kommunikationstechnik und Datenerfassung

2.5.1 Daten- und Informationsflüsse in der Fabrik

Durch die Automatisierungspyramide kann ein Unternehmen als hierarchische Struktur beschrieben werden, die aus mehreren Ebenen besteht. Diese Ebenen können detailliert verschiedenen Level zugeordnet oder in die Bereiche „Unternehmensleitebene“, „Betriebsleitebene“ und „Steuerungsebene“ unterteilt werden (vgl. Abbildung 2-14). [DIN 62264-1], [VDI 5600], [Krämer 2002]

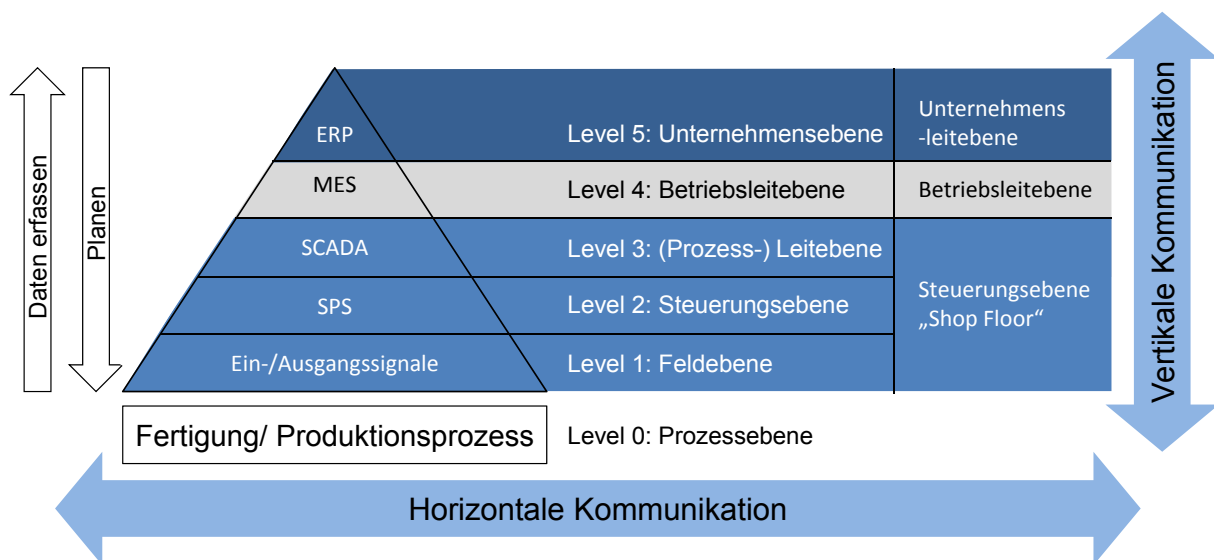


Abbildung 2-14: Automatisierungspyramide (in Anlehnung an [DIN 62264-1], [Krämer 2002], [VDI 5600], [Wellenreuther/Zastrow 2005])

Eine Kommunikation kann grundsätzlich horizontal und/oder vertikal stattfinden:

Unter horizontaler Kommunikation wird jeder Informationsaustausch und jede Interaktion innerhalb einer spezifischen Ebene verstanden. Die horizontale Kommunikation ist im Normalfall rein technisch aufgrund der vorliegenden einheitlichen Protokollen und Bussystemen unproblematisch. Dadurch werden Schnittstellen und somit Schnittstellenverluste minimiert. Man spricht hier von einer Kommunikation unter gleichen „Gesprächspartnern“. [Wellenreuther/Zastrow 2005], [Früh 2000]

Eine vertikale, d.h. Ebenen übergreifende Kommunikation ist aufgrund der nicht einheitlichen Bussysteme und Kommunikationsstandards nur über zuvor definierte Schnittstellen möglich (vgl. Abbildung 2-15). Hierbei kann es zu einem Informationsverlust oder Inkompatibilitäten kommen. Einen Ansatz, um mit der großen Vielzahl von Standards und Schnittstellen umgehen zu können, stellen die unter dem Begriff Open Control Systems bekannten offenen Kommunikationsstandards wie

beispielsweise die OPC-Spezifikation dar. Die OPC-Spezifikation dient z.B. dazu, eine durchgängige Datenkommunikation zwischen der Automatisierungstechnik auf SPS-Ebene und OPC-fähigen Windows-Applikationen zu ermöglichen. [Wellenreuther/Zastrow 2005], [Früh 2000]

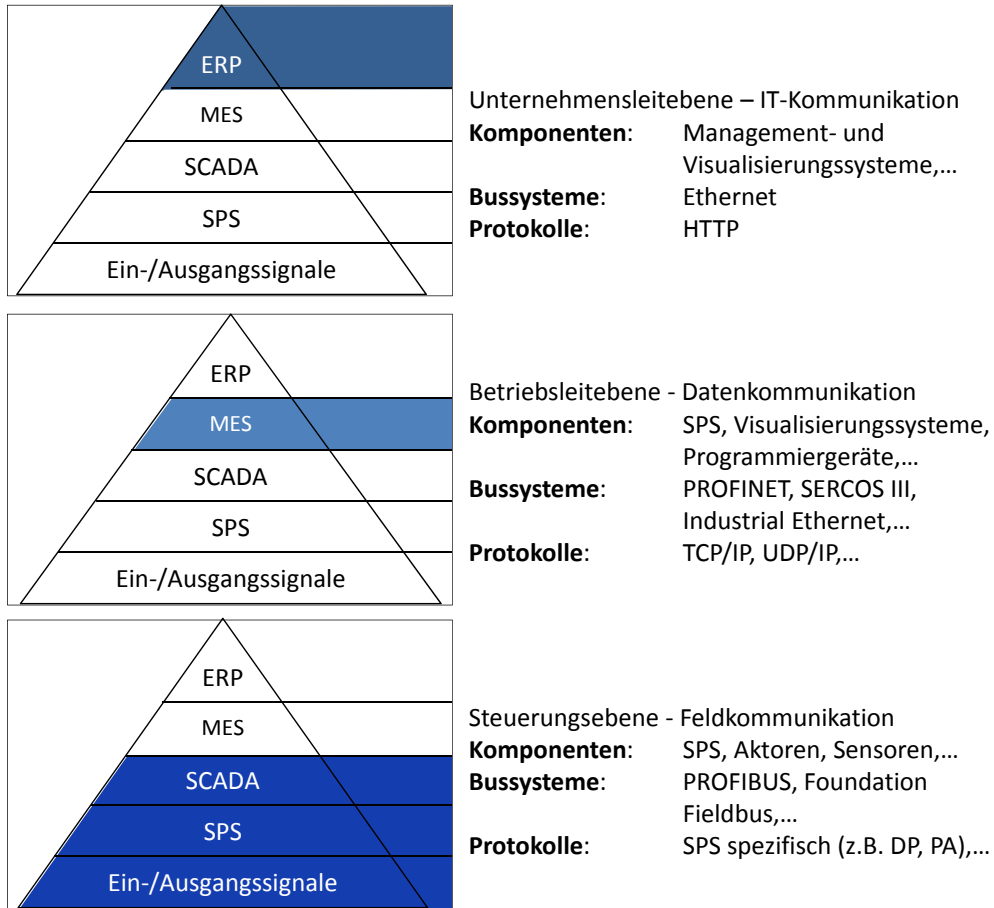


Abbildung 2-15: Kommunikationsstandards in unterschiedlichen Ebenen (in Anlehnung an [Früh 2000])

Steuerungsebene

Die Steuerungsebene „Shop Floor“ umfasst mehrere Teilfunktionalitäten (vgl. Abbildung 2-14):

Auf der Feldebene („Level 1“) wird der Prozess auf Basis der von der Leitebene vorgegebenen Informationen gesteuert.

Auf der Prozessebene („Level 0“) werden die zum Prozess gehörenden Teilschritte zur Erfüllung der Aufgabe angewandt. Im Bereich der Automatisierungstechnik handelt es sich meist um Energie- oder Materialflüsse, die gesteuert oder geregelt werden. [Zacher 2000], [Krämer 2002] Hierfür werden Sensoren und Aktoren über entsprechende Kommunikationssysteme miteinander verbunden. Sie bilden folglich ein Sensor/Aktor-System. Die von der Feldebene bereitgestellten Informationen

werden als Ein- bzw. Ausgangssignale für die übergeordnete, eigentliche Steuerungsebene („Level 2“) verwendet. [Krämer 2002]

Auf dieser Steuerungsebene werden eine Vielzahl von Sensoren und Aktoren über eine Kommunikationsarchitektur miteinander vernetzt und über eine Steuerlogik zu einem intelligenten System verbunden. Die Kommunikation erfolgt über verschiedene Feldbussysteme wie z.B. PROFIBUS („PROcess FIeld BUS“). Es sind strenge Kommunikationsregeln einzuhalten, die über Protokolle definiert sind. Diese sind SPS-spezifisch ausgelegt. Weit verbreitet sind hierbei z.B. die Siemens S7 Protokolle DP („Dezentrale Peripherie“) und PA („Prozessautomatisierung“). [Früh 2000]

Ein zentraler Bestandteil dieser Ebene stellt die Steuerlogik dar, diese koordiniert und moderiert den Kommunikationsablauf. Je nach Komplexität kann der Funktionsumfang um Speicherfunktionen sowie Rechenoperationen erweitert werden. [Weck/Brecher 2006]

Grundsätzlich kann hier zwischen Verbindungsprogrammierbaren Steuerungen (VPS) und Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) unterschieden werden:

Bei VPS wird die erforderliche Steuerungsfunktionalität durch die physikalische Verbindung der Komponenten (wie z.B. Relais oder Halbleiterelementen) untereinander sowie mit den Sensoren und Aktoren sichergestellt. Diese Verbindungen sind „fest verdrahtet“, d.h. eine Änderung im Programmablauf ist nur durch einen mechanischen Eingriff in das bestehende System möglich. [Weck/Brecher 2006]

Speicherprogrammierbare Steuerungen ersetzen zunehmend VPS. Sie haben den Vorteil, dass die Steuerlogik als Softwareprogramm im Speicher abgelegt ist und über Standardsteuerbausteine abgearbeitet wird. So können Änderungen im Programmablauf einfach und schnell durchgeführt werden. [Weck/Brecher 2006]

Die Prozessleitebene („Level 3“) kann als weiteres Element der Steuerungsebene angesehen werden (vgl. Abbildung 2-14). Die Hauptaufgabe besteht im Zusammenschluss mehrerer Ressourcen über ein geeignetes Kommunikationsmedium mit einem Leitreechner. Über die Prozessleitebene ist es möglich, einen ganzheitlichen Blick auf die beteiligten Ressourcen zu bekommen. Die konkreten Aufgaben bestehen hier aus der Ableitung von Teilaufgaben auf Basis des Fertigungsziels, welche durch die Betriebsleitebene festgelegt wurden, sowie einer Steuerung des Materialflusses. Sämtliche auf der Prozessleitebene vernetzten Komponenten werden als Prozessleitsystem (PLS) bezeichnet. [Zacher 2000]

Die Kommunikation auf Basis der Prozessleitebene erfolgt im Normalfall über System-Feldbusse, welche auf Industrial Ethernet basieren und Daten zwischen den einzelnen beteiligten Systemen

austauschen. In der Praxis kommen immer häufiger offene Standards auf Basis von TCP/IP zum Einsatz, die häufig nicht über Echtzeitfähigkeit oder Redundanz verfügen. Sie sind somit nicht für die Kommunikation der prozessnahen Komponenten (PNK) geeignet, welche meist die Funktionen Regeln, Steuern und Überwachen durchführen. [Zacher 2000]

Einer der bekanntesten offenen Standards stellt OPC (OLE für Process Control) dar.

Betriebsleitebene

Auf Betriebsleitebene („Level 4“) werden alle auf der Prozessleitebene definierten Systeme zu einem funktionalen und organisatorischen Gesamtsystem („Betriebsleitsystem“) aggregiert. Zu den bekanntesten Vertretern der Betriebsleitsysteme gehören die Manufacturing Execution Systeme (MES). [Zacher 2000] MES stellen nach *Mussbach-Winter et al.* den Schnittpunkt zwischen den technisch geprägten Leitsystemen der Ausführungsebene und den betriebswirtschaftlich geprägten Unternehmensleitsystemen (ERP-Systemen) dar [Mussbach-Winter et al. 2010].

Die Kommunikation erfolgt häufig über offene Systembusse wie z.B. OPC. *VDI 5600* beschreibt ein MES als System, das bei der „*Erledigung des Arbeitsvorrats unter Berücksichtigung der Produktionsrestriktionen gemäß einer vorgegebenen Zielausrichtung der Produktion*“ unterstützt [VDI 5600]. Die „*vorgegebene Zielausrichtung der Produktion*“ wird hierbei meist von der Unternehmensleitebene vorgegeben.

Zu den Hauptaufgaben des MES zählen neben Funktionen im Material-, Betriebs-, Personal- und Qualitätsmanagement insbesondere die Feinplanung und –steuerung der Produktion über den Fertigungsleitstand sowie die kontinuierliche Datenerfassung und Analyse (vgl. Abbildung 2-16). [VDI 5600]

Das MES-Datenbanksystem (vgl. Abbildung 2-16) stellt einen wesentlichen Bestandteil des MES dar, da es als zentraler Datenhub zwischen Unternehmensleitebene und Steuerungsebene fungiert. Die Auflösung der Daten wird an die jeweilige Zielebene durch Aggregation und Detaillierung angepasst.

Grobe Plandaten aus dem ERP (vgl. folgender Abschnitt) werden innerhalb der Feinplanung in einzelne Arbeitsgänge zerlegt. Hierbei werden Planungsrestriktionen wie z.B. Maschinen- und Personalkapazitäten berücksichtigt. [Mussbach-Winter et al. 2010]

Das Ergebnis der Planungs- und Steuerungsaktivitäten des MES ist ein detaillierter Arbeitsplan, der an die untergelagerte operative Ebene übergeben wird [Kletti 2007].

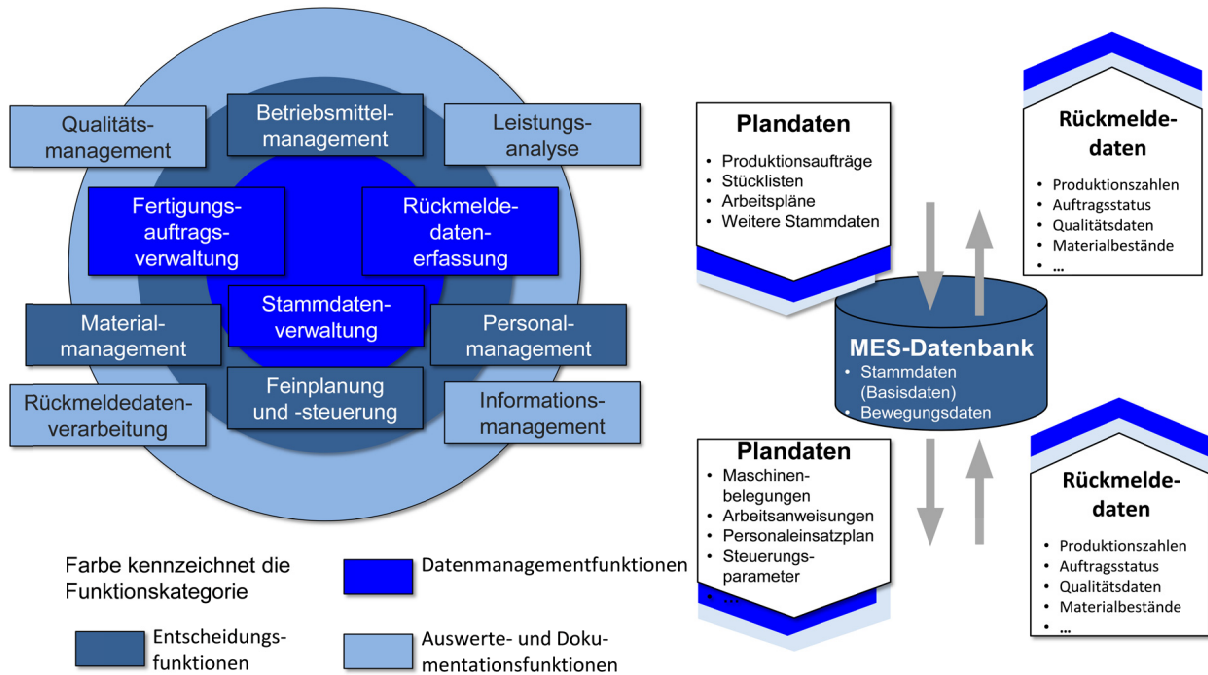


Abbildung 2-16: Funktionalitäten und Datenfluss des MES (nach [Mussbach-Winter et al. 2010] und [Mussbach-Winter 2008])

Aus der operativen Steuerungsebene werden Rückmeldedaten der Produktion an das MES übergeben. Hierzu können neben der Anzahl der Gutteile und zeitlichen Größen auch der aktuelle Status von Aufträgen sowie eine Vielzahl von Maschinendaten wie z.B. Status und Zustand der Ressourcen und der Werkzeuge gehören. Diese Daten, die in der Funktionalität der Betriebsdatenerfassung (BDE) in der MES-Datenbank hinterlegt werden, können in aggregierter Form an die Unternehmensleitenebene übertragen werden. So wird es möglich, frühzeitig Rückschlüsse auf den längerfristigen Planungshorizont bezüglich Abweichungen von den Plandaten zu ziehen. Daraus folgende Änderungen können wiederum als Plandaten an das MES übergeben werden. Es handelt sich somit um einen Regelkreis zwischen der operativen Ebene, der Betriebsleitenebene und der Unternehmensleitenebene. [Kletti 2007], [Mussbach-Winter et al. 2010]

Unternehmensleitenebene

Auf der Unternehmensleitenebene („Level 5“) werden die Informationen, welche über die verschiedenen Unternehmensebenen gesammelt werden, an zentraler Stelle zusammengeführt und logisch miteinander in Bezug gesetzt. Die Basis für die erforderlichen Informationen stellen die Systeme der untergelagerten Betriebsleitenebene wie z.B. das MES dar (vgl. Abbildung 2-14). [Berthold et al. 2005] Aus der betriebswirtschaftlichen Seite sind Produkte der Unternehmensleitenebene als Enterprise Resource Planning (ERP) Systeme zusammengefasst [Gronau 2005].

2.5.2 Datenerfassung, -aufbereitung und –auswertung

Die konsistente Datenerfassung, -speicherung und -bereitstellung nimmt eine zentrale Aufgabe im Unternehmen ein. In der heterogenen Systemlandschaft einer Fabrik existieren eine Vielzahl von Kommunikationsstandards, Schnittstellen und Datenbanksystemen.

Es gilt zu berücksichtigen, dass erfasste bzw. benötigte Daten meist nicht isoliert betrachtet werden: So ist z.B. im Kontext der Energiedatenerfassung eine Kenntnis der Belegungszeiten der Ressourcen von großer Bedeutung, da Zeitdaten einen wesentlichen Einflussfaktor auf den Energieverbrauch sowohl in der Arbeitsplanung als auch in der Arbeitssteuerung darstellen (vgl. Kapitel 2.3). Für die kurz- oder mittelfristigen Aufgaben werden die Belegungszeiten zudem zur Termin- und Kapazitätsplanung verwendet, bei langfristigem Charakter kommen sie zur Dimensionierung der benötigten Gebäuden und Flächen zur Anwendung. [Westkämper 2006]

Durch eine sowohl vertikale als auch horizontale Kommunikation (vgl. Kapitel 2.5.1) kann nicht auf einen einheitlichen Standard zurückgegriffen werden, mit dem alle Daten erfasst und bereitgestellt werden können. Diese dezentrale Datenhaltung und die damit verbundene Datenverarbeitung über Schnittstellen führen zu Informationsverlusten und –defiziten. [Eberspächer et al. 2012]

Diese Aussagen sind auch für die Erfassung energetischer Daten zutreffend. *Leven* definiert vier Varianten, mit denen die Erfassung dieser Daten erfolgen kann [Leven 2005]:

1. Aufteilung des Verbrauchs gemäß Anschluss- oder Nennleistungen der Anlagen
2. Aufteilung des Verbrauchs gemäß der einmalig gemessenen Leistung einer Anlage
3. Einmalige Messung energierelevanter Anlagen in verschiedenen Zuständen und Verknüpfung dieser Daten mit der in der zentralen Leittechnik vorliegenden Zuständen
4. Kontinuierliche Messung aller energierelevanter Anlagen

Hierbei nimmt der Aufwand vom Schritt 1 bis zum Schritt 4 stark zu.

Es existieren verschiedene Möglichkeiten der konkreten Datenerfassung von Felddaten. Allgemein nimmt mit zunehmendem Automatisierungsgrad der Datenerfassung der Aufwand der Eingabe ab und die Genauigkeit der Daten zu. Hierbei gilt jedoch zu berücksichtigen, dass häufig ein erheblicher Aufwand für die Installation einer automatisierten Datenerfassung erforderlich ist. In der Praxis ist das Aufwand/Nutzen-Verhältnis sorgfältig abzuwägen (vgl. Abbildung 2-17). [Lotter/Wiendahl 2006]

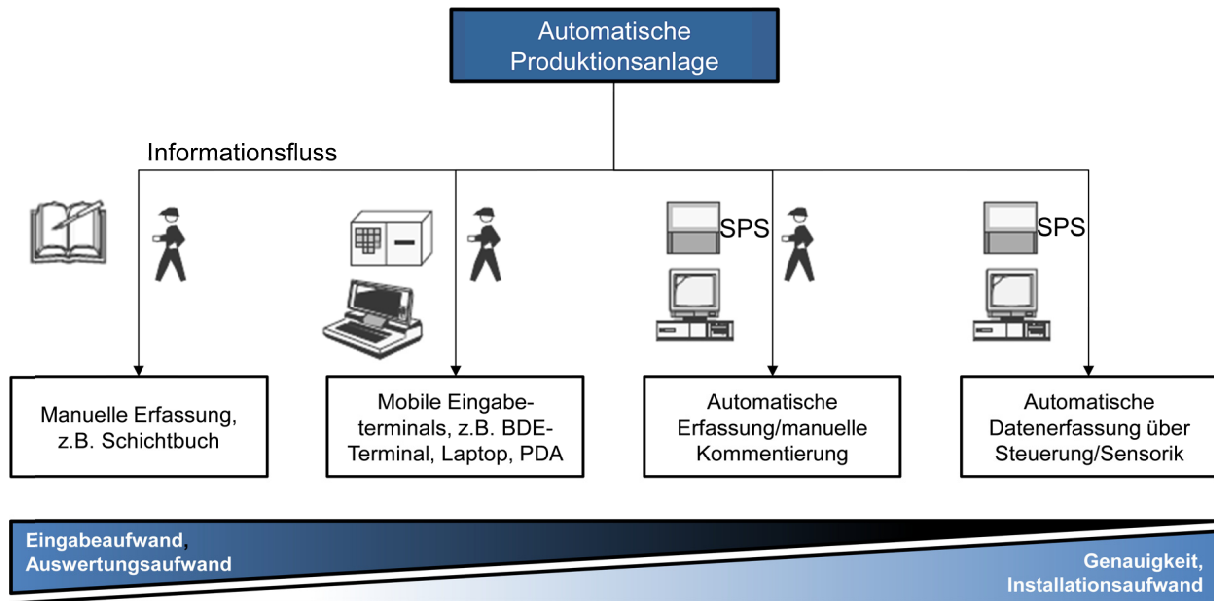


Abbildung 2-17: Möglichkeiten der Datenerfassung (nach [Lotter/Wiendahl 2006] und [Köhrmann 2000])

Die manuelle, handschriftliche Dokumentation der Daten, bei der häufig Stillstandsarten und -ursachen protokolliert werden, stellt die einfachste Art der Datenerfassung dar. Der Nachteil hierbei liegt insbesondere in der unzureichenden Genauigkeit der Daten und der fehlenden Möglichkeit der elektronischen Weiterverarbeitung. [Lotter/Wiendahl 2006]

Um das letztgenannte Problem zu lösen, kann die Dateneingabe durch mobile Eingabegeräte wie z.B. BDE-Terminals oder Laptops erfolgen. Diese Art der Datenerfassung bietet eine hohe Flexibilität, da die Daten manuell eingegeben und nicht aus vorhandenen BDE-Systemen generiert werden. Es können z.B. sowohl Zeitpunkt und Dauer als auch die Ursache einer Störung detailliert erfasst werden. [Wiendahl et al. 1999], [Lotter/Wiendahl 2006] Eine lückenlose Betriebsdatenerfassung ist bei dieser Methode mit großem Aufwand verbunden, außerdem ist die exakte Erfassung von Zeiten problematisch. Eine kontinuierliche Messung und Speicherung der Daten für ein permanentes Controlling ist durch diese Methode nicht zu erzielen. Die Defizite der oben genannten Methoden können durch den Einsatz automatischer Datenerfassungssysteme gesenkt oder vermieden werden. Hierdurch wird die Vergleichbarkeit der Daten erheblich gesteigert (Objektivitätssteigerung), da subjektive Kriterien durch den Menschen ausgeschlossen werden können (vgl. Tabelle 7-2 im Anhang). Daraus resultiert, dass die Kontinuität der Daten über einen längeren Betrachtungszeitraum hinweg gewährleistet werden kann. Charakteristisch für automatische Datenerfassungssysteme ist die Erfassung und Überwachung in Echtzeit. Durch die Kopplung des technischen Prozesses mit einem Rechner nimmt die Genauigkeit und Aktualität der Daten weiter zu. [Lotter/Wiendahl 2006]

Die Betriebsdatenerfassung stellt eine wesentliche Datenquelle dar. Dort werden alle Daten, die für einen wirtschaftlichen Fertigungsprozess erforderlich sind, zur Verfügung gestellt. [Walz/Rüsing 2011]. Daraus resultiert, dass die BDE Zustands- und Leistungsdaten der Maschinen erfasst und speichert. Das ermöglicht es, Aussagen zur Produktion zu treffen oder Kennzahlen z.B. für das Controlling zu bilden. [Gienke/Kämpf 2007] Der Betriebsdatenerfassung kommt eine zentrale Rolle zu, da die aufgenommenen Daten die Grundlage zur Bewertung des aktuellen Zustands der Produktion im Rahmen der Arbeitssteuerung bilden.

VDI Richtlinie 4661 beschreibt einen systematischen Ablauf zur Messung und Verarbeitung von Energiedaten. Ausgehend von einer formulierten Zielsetzung und einer Bestandsaufnahme ist ein Messkonzept zu entwickeln, in welchem Bilanzgrenzen und Messgrößen festgelegt werden. Außerdem ist eine Auswahl über das zu verwendende Messequipment zu treffen. Nach der darauf folgenden Durchführung der Messung ist eine Auswertung vorzunehmen, welche die Basis für eine Ableitung von geeigneten Maßnahmen bildet. [VDI 4661], (vgl. Abbildung 2-18)

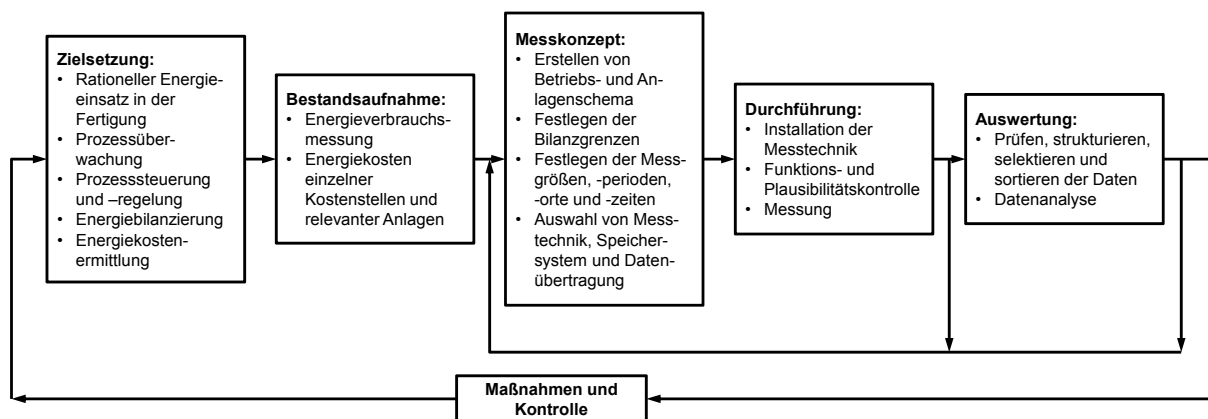


Abbildung 2-18: Erfassung und Verarbeitung energetischer Daten (nach [VDI 4661])

Fazit: Industrielle Kommunikationstechnik und Datenerfassung

Im Vergleich zur horizontalen Kommunikation ist eine vertikale Kommunikation durch die Vielzahl der existierenden Schnittstellen häufig mit Problemen verbunden. Es müssen an die jeweilige Aufgabenstellung angepasste Standards verwendet werden, um eine Ebenen übergreifende Kommunikation zu ermöglichen. Ein weiteres Problem stellen die unterschiedlichen betrachteten Zeithorizonte sowie die Detaillierung der Daten dar: Während auf der Prozessebene mit echtzeitfähigen Systemen und einer sehr hohen Datendichte gearbeitet wird, nehmen diese Faktoren mit jeder überlagerten Kommunikationsebene ab.

Die Datenerfassung kann auf verschiedene Arten durchgeführt werden. Eine kontinuierliche, automatisierte Datenerfassung ist in aktuellen BDE-Systemen Stand der Technik. Diese Systeme sind in

der Linienfertigung weit verbreitet, in der Werkstattfertigung herrscht hier noch Nachholbedarf. Selbst wenn BDE-Systeme zum Einsatz kommen, werden energetische Verbrauchsdaten meist nicht explizit erfasst. Dadurch ist auch eine Verknüpfung zwischen dem aktuellem Maschinenstatus und den energetischen Verbrauchsdaten zumeist nicht möglich. Belegungszeiten hingegen werden in der Regel von der Betriebsdatenerfassung permanent erfasst und lassen sich gut auswerten.

Insbesondere bei der Betrachtung der peripheren Systeme werden nur selten Felddaten ermittelt, da sie im Normalfall nicht über eine umfassende Betriebsdatenerfassung verfügen. Das hat zur Folge, dass über die peripheren Systeme häufig keine Aussagen bzgl. Status und Energieverbrauch getroffen werden kann.

Um diese Defizite beheben zu können, müssen die BDE-Daten um energetische Felddaten erweitert werden. Dabei ist auf einen einheitlichen Zeitstempel von Energiedaten und Belegungszeiten zu achten. Dadurch wird sowohl eine fehlerfreie Berechnung von Energieverbräuchen als auch eine Zuordnung zu den Maschinenstatus sichergestellt.

Die peripheren Systeme, die durch die konventionelle Betriebsdatenerfassung derzeit nicht betrachtet werden, müssen informationstechnisch angebunden werden. Hierbei sind Belegungszeiten mit Status und Energieverbräuche zu erfassen.

Um eine konsistente Datenbereitstellung und Datenhaltung zu gewährleisten, muss die Möglichkeit der Verarbeitung von heterogenen Datenquellen bestehen.

3 Ansätze zur Planung, Bewertung und Optimierung des energetischen Verhaltens von Fabriken

Mit dem Thema der energieeffizienten Planung, Bewertung oder Optimierung von produktionstechnischen Anlagen oder Fabriken befassen und befassten sich eine Vielzahl von Autoren und Forschungsinstituten. Im Folgenden werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Ansätze vorgestellt:

3.1 Bestehende Ansätze

Nach *Kruska* ist der Nutzungsgrad als Verhältnis zwischen Nutzenergieströmen und eingesetzten Energieströmen ebenso wenig wie die reine Energie- und Exergiebilanzierung zur Bewertung von Industriebetrieben geeignet. Energie- und Exergiebilanzen könnten zwar zur Analyse von einzelnen Prozessen verwendet werden, eine Übertragung auf einen Standort sei jedoch nicht möglich. Aus diesem Grund würden häufig Kennzahlen gebildet, welche die Energie z.B. ins Verhältnis zur Produktionsmenge oder zum Jahresumsatz setzten. Da das Produktionsspektrum jedoch im Allgemeinen nicht vergleichbar sei, eigneten sich diese Kennzahlen zur Bewertung nur sehr begrenzt. Das von *Kruska* entwickelte Verfahren versucht am Beispiel von verfahrenstechnischen Prozessen der Milchverarbeitung, eine Bewertung der Energieeffizienz industrieller Betriebe und Prozesse durch die Verknüpfung von thermodynamischer Bilanzierung und Nutzungsgraddefinition auf höherem Aggregationsniveau zu erreichen. Hierfür wurde eine Energieeffizienz Zahl definiert, die eine branchenunabhängige Bewertung erlauben soll. Sie setzt sich aus dem Quotienten des technisch oder theoretisch erforderlichen Energiestroms (dem Referenzwert) und dem tatsächlich zugeführtem Energiestrom zusammen. Zur Ermittlung eines Referenzsystems wurde ein Ansatz im Bereich der Verfahrenstechnik entwickelt, der in einem 7-stufigem Prozess zur Zielerreichung führt (vgl. Abbildung 3-1). [Kruska 2002]

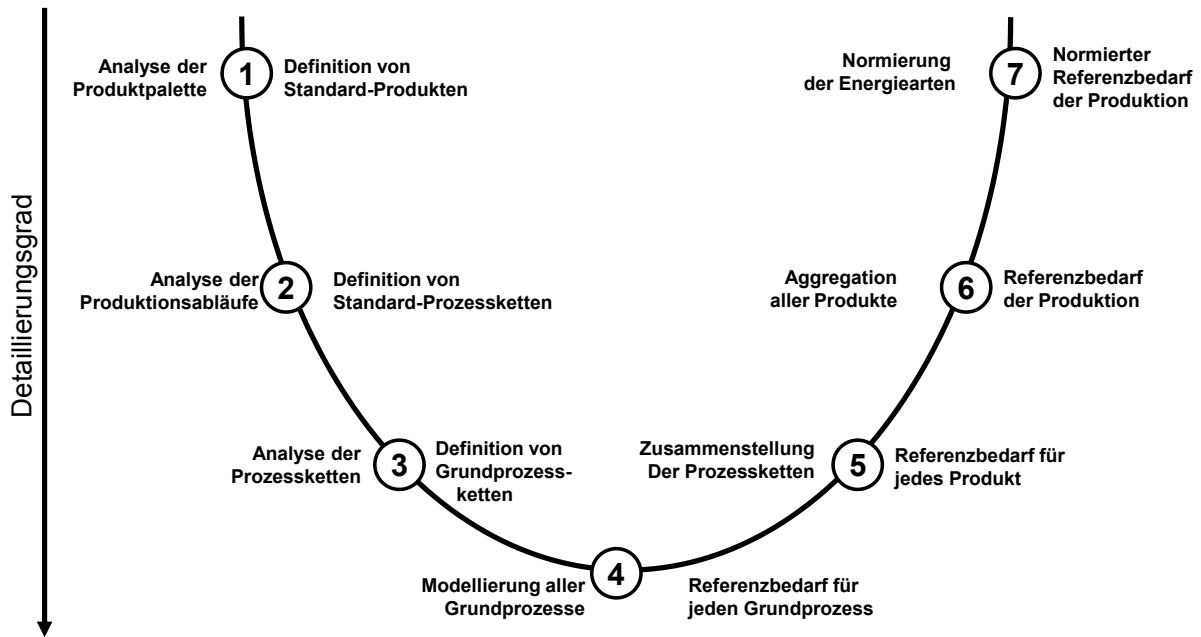


Abbildung 3-1: Methode zur Ermittlung des Referenzbedarfs (nach [Kruska 2002])

Das Referenzsystem definiert *Kruska* als „*energietechnisch optimales System*“ und schlägt zur Ermittlung einen zweiteiligen Ansatz vor [Kruska 2002]:

1. Bestimmung des thermodynamischen Mindestbedarfs für die Produktionsprozesse
2. Die Ermittlung des Energiebedarfs am Stand der Technik

Methoden zur ökologischen Bilanzierung von Produkten am Beispiel spanender Fertigungsverfahren entwickelte *Schiefer*. Hierbei werden funktionale Zusammenhänge zwischen Energiebedarf, Stoffverbrauch, Abfall und Emissionen hergestellt. Der Ansatz beinhaltet Methoden zur Erfassung und Aggregation der benötigten Eingangsgrößen.

Die Berechnung des gesamten Energiebedarfs einer Produktion teilt *Schiefer* dabei in die drei Teilbilanzräume „Spanentstehungsstelle“, „Werkzeugmaschine“ und „Prozessperipherie“ auf. Für jeden dieser Teilbilanzräume ermittelt er den Energiebedarf.

Durch die folgende, zentrale Formel von Victor [Victor 1969] schätzt *Schiefer* den zu erwarteten Energiebedarf an der Spanentstehungsstelle für beliebige Zerspanvolumina ab [Schiefer 2001]:

$$E_{th} = E_{spez} \times V = |k_{c1.1}| \times h^{-C_c} \times f_F \times f_{Verf} \times f_\gamma \times f_\lambda \times f_{sv} \times f_{ver} \times 10^{-3} \times V \quad [J] \quad \text{Formel 3-1}$$

Da diese Formel auch Korrekturfaktoren für das Verfahren und die Form enthält, kann eine Abschätzung der Zerspanungsenergie für beliebige Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide verwendet werden [Schiefer 2001], [Paucksch 2008]. Zur Bestimmung der einzelnen Korrekturfaktoren fasst *Schiefer* bestehende Literaturwerte zusammen. [Schiefer 2001]

Den erforderlichen Ressourcenbezug (Werkzeugmaschine) wird durch die folgende Formel 3-2 hergestellt:

$$W_{Ressource} = P_{leer} \times t_g + P_{grund} \times (t'_B - t_g) \quad \text{Formel 3-2}$$

Durch eine Addition des Energiebedarfs an der Spanentstehungsstelle und des ressourcenabhängigen Energiebedarfs kann so der Gesamtbedarf einer Werkzeugmaschine bestimmt werden. Außerdem gibt *Schiefer* bei der Ermittlung des Energiebedarfs für die Werkzeugmaschine verschiedene empirisch erfasste Zuschlagfaktoren für die Belegungszeiten sowie konkrete Energiebedarfe von Werkzeugmaschinen und der Prozessperipherie an. [Schiefer 2001]

Junge befasste sich mit der simulationsgestützten Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Der Schwerpunkt bei diesem Ansatz liegt auf der Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Emissionen, Lüftung und Wärmeverlusten in Bezug auf die logistischen und wirtschaftlichen Zielgrößen in der kunststoffverarbeitenden Industrie. Um die komplexen Wechselwirkungen darstellen und hinsichtlich der Energieeffizienz bewerten zu können, wählt *Junge* einen simulationsbasierten Ansatz, in dem er die Materialflusssimulation mit der Simulation der thermischen Gebäudetechnik koppelt. Durch verschiedene Kenngrößen und die drei Zielszenarien „Temperaturtrend“, „Unterscheidung Tag/Nacht“ und „Lüftungswärmeverluste“ werden Optimierungsmaßnahmen abgeleitet. [Junge 2007]

Engelmann hat in seiner Arbeit Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fabriken entwickelt. Er fokussierte sich auf die Planung von Produktionsprozessen in der Automobilindustrie und entwickelte hierfür Handlungsansätze, um bereits in der Konzeptphase eine Orientierung bezüglich der späteren Energieeffizienz zu ermöglichen. Der Ansatz resultiert aus der Erkenntnis, dass nach *Engelmann* eine Lücke zwischen dem methodischen Planen einer Fabrik und dem energetischen Prozesswissen besteht. Diese Tatsache habe zur Folge, dass die größten energetischen Optimierungspotentiale, die in der Planung auftreten, ungenutzt bleiben. Das Ergebnis des Ansatzes ist die Bereitstellung von Handlungsanweisungen, die den Planer bereits in der Konzeptionsphase unterstützen sollen, die spätere Energieeffizienz einer Fabrik zu steigern. Hierzu zählen z.B. die Auswahl von Verfahren mit hohen energetischen Wirkungsgraden, die Reduzierung der Energieverlusten in der gesamten Nutzungskette, die Nutzung von Energierückgewinnung, die energetisch optimale Dimensionierung der Anlagen sowie eine energieoptimale Fahrweise der Ressourcen, die auf eine hohe Auslastung abzielt. [Engelmann 2009], [Müller et al. 2008]

Leven verfolgte in seinem Ansatz die Entwicklung eines Systems von Energiekennwerten für ein Automobilwerk mit dem Ziel, im Rahmen eines betrieblichen Energiemanagements verschiedene

Verbesserungspotentiale zu identifizieren und umzusetzen. Der Schwerpunkt dieses Ansatzes liegt auf der Identifikation und Selektion geeigneter Kennzahlen, die in Abhängigkeit des Bilanzraums gewählt werden. Um den Aufwand der Datenerfassung möglichst gering zu halten, basiert der Ansatz auf vorhandenen Daten. [Leven 2005] Ähnlich wie *Kruska* bezieht *Leven* die Kennwerte auf Vergleichswerte wie z.B. die produzierte Stückmenge oder einen ermittelten Referenzbedarf. Er schlägt außerdem die Durchführung einer Regressionsanalyse vor, mit deren Hilfe Abhängigkeiten der Einflussfaktoren auf den Energiebedarf ermittelt werden können. [Leven 2005]

Eine Kennzahl zur Bewertung der Energieeffizienz bei der Erzeugung von Eisen- und Stahlprodukten mit dem Ziel der Reduktion von Energie und Umweltbelastungen entwickelte *Stiens*. Die Kennzahl basiert auf einem gesamtheitlich definierten Wirkungsgrad und kann zur Formulierung und zur Umsetzung von Umweltzielen beitragen. *Stiens* setzt bei der Bewertung der Prozesse und Prozessketten an und bildet auf dieser Basis eine Kennzahl für die verschiedenen Bilanzierungsebenen der Produktion. Die Datenbasis bilden sowohl gemessene Felddaten als auch Literaturangaben. Die Arbeit dient als Grundlage für eine energieeffiziente Produktionsplanung in der Eisen- und Stahlindustrie sowie für ein Benchmarking vergleichbarer Herstellungswege. [Stiens 2000]

Rager entwickelte eine Methodik für eine energieorientierte Maschinenbelegungsplanung. Der Ansatz ist beschränkt auf identische parallele Maschinen der Werkstattfertigung in der Textilindustrie und legt den Schwerpunkt auf die betriebswirtschaftlichen Aspekte. *Rager* fokussiert sich auf die beiden Lösungswege

- Minimierung der Anzahl der belegten Maschinen
- Glättung des zeitlichen Verlaufs des Energiebedarfs

Zur Problemlösung verwendet er heuristische Lösungsansätze auf Basis von evolutionären Algorithmen, welche er in ein Simulationssystem integriert. Durch diesen Ansatz wird es ermöglicht, mit Hilfe einer energieorientierten Terminierung ein ausgeglichenes energetisches Lastprofil zu erarbeiten und umzusetzen. [Rager 2008]

Müller erarbeitete einen Ansatz zu energieeffizienzorientierten Fabrikplanung. Dieser Ansatz basiert auf den von *Schmigalla* eingeführten Hauptaktivitäten der Fabrikplanung Systemanalyse, -konzipierung, -synthese sowie -realisierung. Der Schwerpunkt der Methodik liegt in einer Erweiterung dieser Planungsaktivitäten um energetische Informationen. Bei den energetischen Informationen handelt es sich insbesondere um den Austausch von Energiedaten zwischen Fabrikplanung und Fabrikbetrieb sowie den beteiligten Fachdisziplinen. [Schmigalla 1995], [Müller et al. 2009]

Weinert entwickelte eine „Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme“. Die grundlegende Methodik besteht in der Erarbeitung von „EnergyBlocks“ und der Kopplung mit einem System vorbestimmter Zeiten. Bei den „EnergyBlocks“ handelt es sich um eine zustandsbasierte Gliederung der Energieaufnahme verschiedener Betriebsmittel. Es wird davon ausgegangen, dass ähnliche Betriebsmittel über vergleichbare energetische Profile verfügen. Außerdem wird zwischen Standardzuständen und Sonderzuständen unterschieden: Standardzustände sind „im kontinuierlichen Produktionsablauf auftretende Betriebszustände“, bei den Sonderzuständen handelt es sich um „ergänzende Zustände, die die Ausführbarkeit der Grundzustände sicherstellen“. Die zeitliche Verweildauer der einzelnen Zustände wird in zeitvariable und konstante Anteile aufgeteilt. Die zeitvariablen Zustände sind hierbei von verschiedenen Faktoren wie z.B. der Produktionsaufgabe abhängig. Auf Basis dieser Methodik wurde ein System entwickelt, das bei der Planung des Energiebedarfs von Produktionssystemen unterstützt. Weinert stellt außerdem verschiedene Methoden vor, mit denen die Energieprofile von Produktionsmaschinen ermittelt werden können. [Weinert 2010]

Herrmann et al. definierten Voraussetzungen, die zu erfüllen sind, um ein ganzheitliches Systemverständnis zu entwickeln. Dieses bildet nach Herrmann et al. die Grundlage, um eine Fabrik oder ein Subsystem der Fabrik energetisch planen, bewerten und optimieren zu können. Im Einzelnen handelt es sich hierbei um

- ein erweitertes Prozessverständnis,
- eine ganzheitliche Systemdefinition der Fabrik,
- eine Dynamisierung von Verhalten und Wechselwirkungen,
- ein Denken in Prozessketten,
- eine Lebenszyklusorientierung sowie
- eine Berücksichtigung aller Nachhaltigkeitsdimensionen.

[Herrmann et al. 2010].

Devoldere et al. erarbeiteten eine Methode, um die Energieverbräuche verschiedener Betriebsmittel erfassen und miteinander vergleichen zu können. Es wurden verschiedene Zustände der Betriebsmittel ermittelt und analysiert. Darauf aufbauend können verschiedene, alternative Betriebsmittel hinsichtlich ihres energetischen Verhaltens verglichen und Verfahrensalternativen bewertet werden. Ein Schwerpunkt dieses Ansatzes liegt zudem auf der Erfassung und Analyse nicht wertschöpfender Zeiten. Mehrere von Devoldere et al. durchgeführte Fallstudien kamen zum Ergebnis, dass im Be-

reich der nicht produktiven Betriebszustände erhebliche Einsparpotentialen von bis zu 65% bei Biegepressen erzielt werden können. [Devoldere et al. 2007], [Devoldere et al. 2008]

Dietmair et al. entwickelten einen zustandsbasierten Modellansatz für die Verbrauchsermittlung von Fertigungsmaschinen. Hierfür wurden Betriebszustände der Maschinen sowie die Übergänge der Zustände in einem Modell abgebildet, welches neben den Zuständen auch die Kinematik und Prozessgrößen berücksichtigt. Eine Verknüpfung der Modelle mit realen Betriebsdaten erlaubt eine genaue Abschätzung der Fertigungsaufgabe auf Basis eines Verbrauchsprofils. Dieser Ansatz dient zudem als Grundlage für eine weitere Methodenentwicklung hinsichtlich Energieeffizienzsteigerung wie z.B. Komponenten- oder Parameteroptimierung der Fertigungsmaschinen oder die Bewertung von Verfahrensalternativen sowie eine Ablaufoptimierung. [Dietmair et al. 2008] Der Ansatz von *Dietmair et al.* wird in der DFG-Forschergruppe „ECOMATION“ weiterentwickelt. [Dietmair/Verl 2010]

Bonneschky erstellte eine Methodik zur Integration von Energiekenngrößen in PPS-Systeme der Steine-Erden Industrie. Hierfür wird das betrachtete System in „Input“, „Throughput“ und „Output“ gegliedert. Der Transformationsprozess („Throughput“) wird nach dem U/P/N- Modell von *Schieferdecker* weiter detailliert. [Bonneschky 2002] Dieses Modell gliedert die Produktion in Umwandlungs-, Produktions- und Nebenanlagen (U/P/N) und stellt ihre Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zueinander dar. Es versucht damit die Frage „was geht wohin?“ zu beantworten. [Schieferdecker et al. 2006] *Bonneschky* wählt zur Bewertung zunächst die zwei Kennzahlen Gesamtstromverbrauch und Brennstoffeinsatz, bezogen auf den Umsatz, aus. Hieraus leitet er weitere Kennzahlen ab. In einem weiteren Schritt werden die Subsysteme energetisch bewertet sowie eine Verknüpfung mit dem PPS-System durchgeführt. Daraus ergibt sich eine Gesamtmethodik, mit der im Bereich der Arbeitssteuerung permanent Energiedaten zur Verfügung stehen und z.B. für Bedarfsprognosen oder zur Bewertung ähnlicher Produktionsprogramme verwendet werden können. [Bonneschky 2002]

TEEM („Total Energy Efficiency Management“) wurde am Fraunhofer IPA entwickelt und stellt einen ganzheitlichen Ansatz dar, der Methoden zur Erfassung, Analyse und Optimierung des Energieeinsatzes miteinander verbindet. Die Grundlage hierfür wird durch einen Methodenbaukasten ermöglicht, mit dem die Ziele verfolgt werden, relevante Energiearten zu identifizieren, den Energieeinsatz hinsichtlich der Effizienz zu bewerten, Verbesserungspotentiale aufzuzeigen sowie geeignete Maßnahmen abzuleiten. Der Ansatz besteht aus den vier Säulen Energiewertstrom, Ener-

giemanagementsysteme, Messkonzepte sowie Simulation und Visualisierung [Wahren 2010] (vgl. Abbildung 3-2):

Die Energiewertstrommethode dient der ganzheitlichen Erfassung, Bewertung und Optimierung des produktionsbezogenen Energieverbrauchs. Sie gliedert sich in die Analyse, das Design und die Umsetzung. In der Analyse wird eine kennzahlenbasierte Bewertung des bestehenden Systems vorgenommen. Hierfür wird insbesondere die Kennzahl „Effizienzgrad“ herangezogen. Um diese Kennzahl bilden zu können, ist die Bestimmung eines Referenzsystems erforderlich (vgl. Kapitel 2.4). Es werden mehrere Möglichkeiten zur Bestimmung vorgeschlagen [Erlach/Westkämper 2009], [Westkämper/Verl 2011]:

- Ermittlung des „spezifischen Energieverbrauchs nach dem Stand der Technik“
- Bestimmung des spezifischen „Energieverbrauchs des unternehmensintern besten Produktionsprozesses mit vergleichbarer Technologie [...]“
- „Vorgabe für die jährlich prozentual zu erreichende kontinuierliche Reduzierung des Energieverbrauchs“

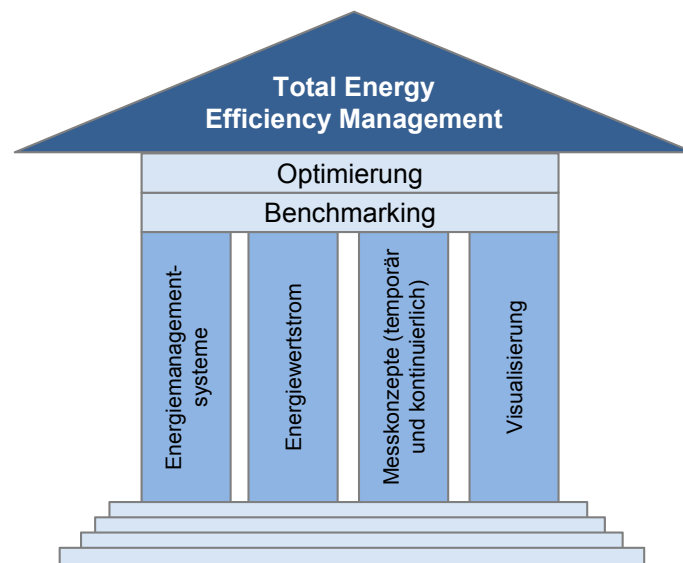


Abbildung 3-2: Aufbau von TEEM (nach [Wahren 2010])

Der Aufnahme und Analyse des Energiewertstroms folgt das Energiewertstromdesign, mit dessen Hilfe ein energieoptimiertes Soll-Konzept entwickelt werden kann. Hierbei erfolgt eine starke Anlehnung an das klassische Wertstromdesign. Im abschließenden Schritt wird das entwickelte Soll-Konzept umgesetzt. [Erlach/Westkämper 2009], [Westkamp et al. 2010]

Die Säule des Energiemanagementsystems basiert auf der DIN Norm 16001. Durch den regelmäßigen Vergleich von Soll- und Ist-Werten soll eine Verschwendung frühzeitig erkannt und Maßnahmen abgeleitet werden. [DIN EN 16001], [BMU 2010]

Die „Energiesmesstechnik“ beinhaltet Konzepte zur temporären oder permanenten stationären und instationären Messung der vorhandenen Energieströme. In der Säule der „Visualisierung und Simulation“ werden Methoden zur Verfügung gestellt, mit deren Hilfe sowohl eine visuelle Analyse des Systems als auch eine Simulation des dynamischen Verhaltens durchgeführt werden kann. [Wahren 2010], [Westkämper/Verl 2011]

Das *Aachner Modell* stellt einen Ansatz dar, mit dem ausgehend von einer Bewertung der Produktion Ressourcenverschwendung aufgezeigt und anschließend optimiert werden kann. Der Kern dieses Ansatzes besteht in einer Effizienzmatrix, mit der Teilsysteme des Unternehmens bezüglich der Ressourcengruppen Energie, Wasser, Material und Hilfsmittel systematisch anhand verschiedener Kriterien bewertet werden können. Der Ansatz stellt eine strukturierte Vorgehensweise für das Aufzeigen von Verschwendung dar und kann zur Schwachstellenanalyse der Produktion verwendet werden. [Schuh et al. 2010]

3.2 Relevante Forschungsprojekte

Das BMBF-Projekt ProGRess befasst sich mit der Gestaltung von effizienten Prozessketten am Beispiel von Aluminiumdruckguss. Der verfolgte Ansatz besteht in der Betrachtung der Energieverbräuche und Stoffströme von den Einzelprozessen bis hin zu den unternehmensübergreifenden Lieferketten. Hierbei wird, ausgehend von Unternehmenskennzahlen der am Projekt beteiligten Industrieunternehmen, ein Effizienzmaß für die individuellen Produktionssysteme generiert. So kann auf Basis von Kennzahlen wie z.B. dem Energieaufwand pro Fertigteile die energetische Optimierung der Prozesskette „Aluminiumdruckguss“ erfolgen. [Hermann et al. 2011]

Im BMBF-Projekt EnHiPro („Energie- und Hilfsstoffoptimierte Produktion“) wird das Ziel verfolgt, organisatorische und technische Maßnahmen bei KMU zu ermitteln, mit denen sowohl zur Steigerung der Energieeffizienz als auch zur Bewertung der Auswirkungen beigetragen werden kann. Der Schwerpunkt liegt in der Integration der Energie- und Hilfsstoffverbräuchen in das betriebliche Produktionsmanagement. Der Energieverbrauch der Ressourcen der Hauptprozesse sowie der peripheren Systeme wird nicht explizit betrachtet. [Herrmann et al. 2010]

Das BMWi-Forschungsprojekt ENOPA („Energieeffizienz durch optimierte Abstimmung von Produktion und technischer Gebäudeausrüstung“) befasst sich mit Ansätzen, Produktion und Gebäude-

technik bereits in der Planungsphase aufeinander abzustimmen, um damit eine höhere Energieeffizienz zu erreichen. Hierbei werden verschiedene Simulationssysteme wie z.B. Materialflusssysteme und thermische Gebäudesimulation um energetische Informationen erweitert und miteinander gekoppelt. Auf diese Weise können die komplexen Wechselwirkungen zueinander in Bezug gesetzt werden. Hierfür wird nicht auf Felddaten zurückgegriffen, da die Betriebsphase nicht berücksichtigt wird. [Martin et al. 2008]

In dem vom BMBF geförderten Verbundprojekt reBOP wird ein ganzheitliches Konzept zur umfassenden Bewertung und Optimierung von Prozessketten unter Ressourcengesichtspunkten entwickelt. Hierfür wird ein Kennzahlensystem erarbeitet, welches unterschiedliche Prozesse vergleichbar macht. Auf Basis dieser Prozessbeurteilung sollen organisatorische und technische Optimierungspotenziale abgeleitet werden. Die erarbeiteten Methoden werden am Beispiel des Presshärtens validiert. [Meier et al. 2009]

Im Projekt EnoPRO („Energieoptimierte Bahnplanung zur Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen in der Produktion“) steht die Ressourceneffizienz von Werkzeugmaschinen im Vordergrund. Der Schwerpunkt liegt dabei auf technologischen Optimierungen in Bezug auf eine verbesserte Bahnplanung und optimierter Kühlkonzepte [Brecher et al. 2009].

Bei BEAT („Bewertung der Energieeffizienz alternativer Prozesse und Technologieketten“) handelt es sich um ein Verbundprojekt, welches das Ziel hat, ein Softwaretool zur Auswahl der effizientesten Prozesskette in der Zerspanung auszuwählen. Zur Zielerreichung werden Felddaten erfasst und den Prozessen zugeordnet. Diese Daten werden mit physikalischen Wirkprinzipien abgeglichen und zur Bildung von Kennwerten für die Beurteilung der Energie- und Ressourceneffizienz herangezogen. [Schlosser et al. 2011]

Im Rahmen des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD) wird eine energiesensitive Produktionssteuerung entwickelt. Ziel ist es, die Ressourcen insbesondere in nicht-wertschöpfenden Zeiten in einen geeigneten energetischen Zustand zu versetzen. Hierbei wird ein Algorithmus entwickelt, der erforderliche Anlaufzeiten der Ressourcen mit den möglichen Stillstandszeiten vergleicht, um so eine geeignete Maßnahme abzuleiten zu können. Der Ansatz ermöglicht prinzipiell die Berücksichtigung von peripheren Systemen sowie eine Kommunikation der beteiligten Ressourcen über Schnittstellen wie z.B. OPC UA. [Neugebauer et al. 2012]

Die DFG Forschergruppe FOR 1088 „ECOMATION“ verfolgt das Ziel, Methoden zur Einsparung von Energie durch Automatisierung für die spanende Fertigung zu entwickeln, mit denen die ge-

samte Fertigung permanent am energetisch optimalen Betriebspunkt betrieben werden kann. Hierfür wurden verschiedene Teilprojekte definiert, durch die sämtliche Skalen in der Fabrik von den einzelnen Maschinen- oder Prozessmodellen über die Steuerung bis hin zur gesamten Fertigung inklusive der Peripherie berücksichtigt werden können (vgl. Abbildung 3-3). Durch ein situationsoptimales Ansteuern verschiedener Ressourcen kann der Verbrauch von einzelnen Maschinen optimiert werden. Auf Basis der Leitebene soll es möglich werden, durch maschinenferne Energieregelle Kreise Verlustherde sowohl von Anlagen als auch von der Peripherie zu identifizieren und Verbesserungsmaßnahmen einzuleiten. Im Teilprojekt der „maschinenfernen Regelkreise“ („TP3“, vgl. Abbildung 3-3) wird eine Methodik entwickelt, die Planer und Betreiber von Fabriken im Rahmen der Planung, Optimierung und Überwachung unterstützt. Hierbei soll die Energieplanung eine Prognose des Energiebedarfs von Ressourcen der spanenden Fertigung inklusive ihrer Peripherie auf Basis der geplanten Fertigungsaufträge und organisatorischen sowie technischen Vorgaben ermöglichen. Die Energieoptimierung verfolgt das Ziel, die Fertigung unter Berücksichtigung sämtlicher beteiligter Systeme am energieoptimalen Betriebspunkt zu betreiben. Die Controlling – Funktionalität soll es schließlich ermöglichen, das Fertigungssystem unter Berücksichtigung alternativer Produktionsziele permanent zu überwachen und zu steuern, so dass bei Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Größen auf den verschiedenen Fabrikskalen umgehend eingegriffen werden kann. [Verl et al. 2011], [Haag et al. 2011], [Schlechtendahl et al. 2011], [Haag et al. 2012] Die Arbeiten der Forschergruppe, insbesondere im Teilprojekt 3, stellen eine wichtige Grundlage für den im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden eigenen Ansatz dar.

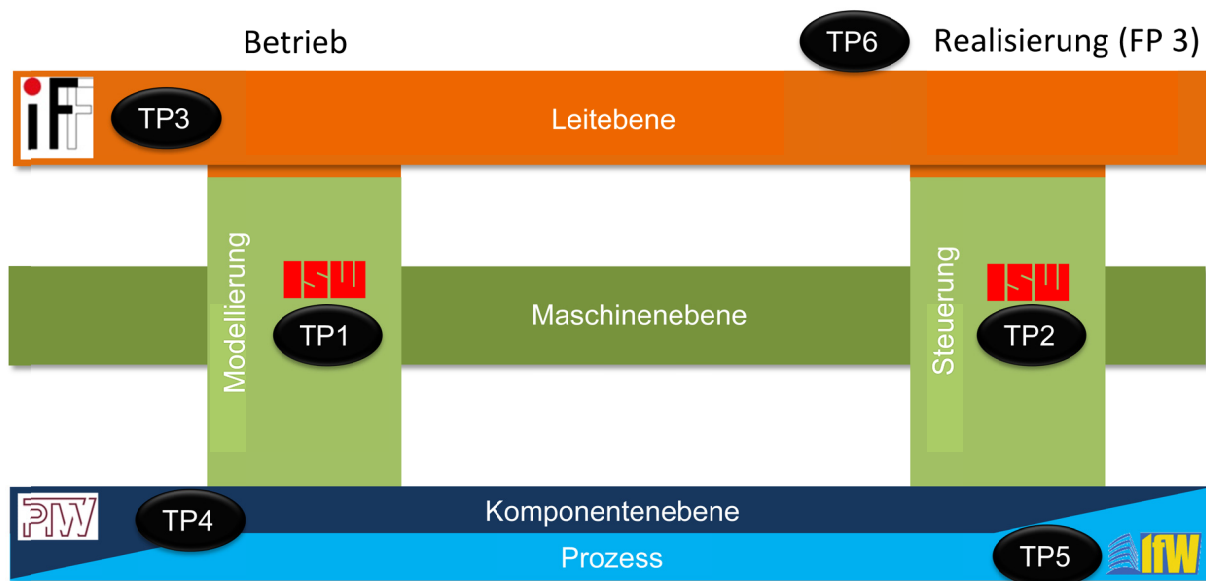


Abbildung 3-3: Aufbau der DFG Forschergruppe "ECOMATION"

3.3 Fazit und Abgrenzung der Arbeit

Die untersuchten Ansätze und Forschungsprojekte befassen sich mit den unterschiedlichen Aspekten der Energieeffizienz in der Produktion. Diese reichen von der reinen energetischen Planung bis hin zur Optimierung der Produktion mit evolutionären Algorithmen. Diese breite Spanne an Schwerpunkten macht deutlich, dass es in einem einzelnen Ansatz nicht möglich ist, alle Teilaspekte detailliert zu betrachten.

In der folgenden Abbildung 3-4 werden bestehende Ansätze qualitativ hinsichtlich der in der Zielsetzung dieser Arbeit abgeleiteten Kriterien bewertet:

		in der Zielsetzung abgeleitete Anforderungen an die Methodik							
		Messtechnik / Felddatenerfassung	Modellierung / Simulation	Bewertung/ Vergleich auf Basis von Kennzahlen	Planung	Steuerung im Rahmen der Arbeitsplanung	Steuerung im Rahmen der Arbeitssteuerung	Berücksichtigung der Peripherie	Optimierungs- maßnahmen
individuelle Ansätze	Bonneschky	●	●	●	●	●	○	●	●
	Devoldere	●	●	●	●	●	○	●	●
	Dietmair	●	●	●	●	●	○	●	●
	Engelmann	●	○	○	●	○	○	●	●
	Junge	●	●	●	●	●	○	●	●
	Kruska	●	●	●	○	○	○	●	○
	Leven	●	○	●	○	○	○	●	○
	Rager	●	●	●	●	●	○	●	●
	Schiefer	●	●	○	●	○	○	●	●
	Stiens	○	○	●	○	○	○	●	○
	Weinert	●	●	○	●	●	○	●	●
Forschungs- projekte	BEAT	●	●	●	●	●	○	●	●
	ECOMATION	●	●	●	●	●	●	●	●
	EnHiPro	●	●	●	●	●	○	●	●
	eniPROD	●	●	○	●	○	●	●	●
	e-SimPRO	●	●	●	●	○	○	●	●
	ProGRess	●	●	●	●	●	○	●	○
allg. An- sätze	TEEM	●	●	●	●	○	○	●	●
	Aachener Modell	●	○	○	●	○	○	●	●

Legende:
 trifft zu ●
 trifft teilweise zu ●
 trifft nicht zu ○

Abbildung 3-4: Gegenüberstellung bestehender Ansätze zu Anforderungen

Die Analyse zeigt außerdem, dass die energetischen Zusammenhänge in der Produktion komplex sind und in einem ersten Schritt transparent gemacht werden müssen. Hierfür sind Wirkzusammenhänge darzustellen und Möglichkeiten zu untersuchen, wie diese Zusammenhänge in ein Modell

überführt werden können. Die Kombination aus dem Modellierungsansatz der Systemwissenschaften mit dem Peripheriemodell stellt aus der Sicht mehrerer Autoren eine geeignete Modellierungsgrundlage dar (vgl. Abbildung 3-4).

Die energetische Modellierung der Ressourcen der Hauptprozesse sowie der peripheren Systeme erfolgt häufig auf einem hohen Abstraktionsgrad. Konkrete Wechselwirkungen zwischen den Hauptprozessen und der Peripherie werden nicht ermittelt. Die Berechnung der Verbrauchswerte zur Erstellung einer Prognose basiert z.B. im Ansatz von *Schiefer* auf empirisch ermittelten Werten. Die Erfassung und strukturierte Weiterverarbeitung von Felddaten ist für die energetische Planung, Bewertung und Optimierung einer Produktion nach Ansicht zahlreicher Autoren von zentraler Bedeutung. Hierbei ist es wichtig, nicht nur energetische Felddaten zu erfassen, sondern diese mit den Betriebsdaten in Bezug zu setzen. Diese Kopplung aus Felddaten und dem Zustand der Ressourcen werden insbesondere in den Ansätzen von *Dietmair*, *Devoldere* und *Weinert* verwendet, um den Energiebedarf statusbasiert modellieren und prognostizieren zu können. Allerdings werden bei diesen Ansätzen die peripheren Systeme nicht explizit berücksichtigt. Des Weiteren findet keine Verknüpfung mit einer BDE oder einem Datenbanksystem statt. Somit ist auch eine Weiterverwendung der Daten nur begrenzt möglich.

Auch die kennzahlenbasierte Bewertung verschiedener Szenarien wird in mehreren Ansätzen vorgenommen. Häufig ist jedoch die Detaillierung der Kennzahlenermittlung auf einem hohen Aggregationsniveau. Außerdem werden zumeist nur die Hauptprozesse oder die Produktion als Ganzes durch eine Kennzahl beurteilt. Die erforderliche explizite Bewertung der Subsysteme, die eine wichtige Grundlage für die energetische Optimierung bildet, wird nicht vorgenommen.

Die Herausforderung bei der Kennzahlenbildung stellt neben der Auswahl der geeigneten Kennzahlen zweifelsohne die Datenerfassung bzw. die Qualität der vorhandenen Daten dar.

Aus diesem Grund ist die oben erwähnte Datenerfassung nach Meinung zahlreicher Autoren auch im Kontext der kennzahlenbasierten Bewertung von Szenarien wichtig.

Der unternehmensübergreifende energetische Vergleich mit Hilfe eines Referenzwertes (z.B. bei der Bestimmung des energetischen Effizienzgrades) ist in der Praxis schwer umzusetzen. Insbesondere *Kruska* befasste sich detailliert mit der Ermittlung eines Referenzbedarfs. Seine Vorgehensweise aus dem Bereich der Verfahrenstechnik ist jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden und kann im Maschinen- und Anlagenbau objektiv nur sehr schwer umgesetzt werden, da insbesondere die Bestimmung des Energiebedarfs nach dem „*Stand der Technik*“ eine kaum zu ermittelnde Größe darstellt. Die theoretische Ermittlung des Referenzbedarfs dagegen kann im Einzelfall jedoch

zielführend sein. Für Teile der Peripherie und für Hauptprozesse ist es möglich, den theoretischen Energiebedarf zu ermitteln. Hierfür existieren in der Literatur verschiedene Berechnungsformeln zur Abschätzung (vgl. Kapitel 2). Für das Gesamtsystem ist diese Methodik jedoch nur bedingt geeignet, da das dynamische Verhalten des Gesamtsystems nicht erfassbar ist. Außerdem ist die theoretische Ermittlung mit großem Aufwand verbunden.

Die Integration der Arbeitsplanung in die energetische Betrachtung stellt einen wichtigen Schritt zur Energieeffizienzsteigerung dar, da in der Planungsphase wesentlich mehr Einfluss auf das spätere Verhalten des betrachteten Systems genommen werden kann als im laufenden Betrieb. Diese Tatsache machten sich *Schiefer* und *Weinert* zu nutzen, die Methoden zur Planung des energetischen Verhaltens entwickelten. Insbesondere die Abschätzung des Energiebedarfs für den Fertigungsprozess an der Spanantstehungsstelle nach Formel 3-1 kann im Rahmen dieser Arbeit bei der Verknüpfung zwischen den Modellen und der Arbeitsplanung sowie für die Ermittlung des Prozessenergiebedarfs auf Basis von Plandaten verwendet werden.

Die Integration der Steuerung im Rahmen der Arbeitssteuerung wurde besonders von *Bonneschky* durch das Einbeziehen von Energiekenngrößen in ein PPS-System vorgenommen. Allerdings ist bei diesem Ansatz kein Durchgriff von der PPS auf das Realsystem möglich. Das bedeutet, dass eine ereignisinduzierte Beeinflussung der Produktion mit dem Ansatz von *Bonneschky* nicht umsetzbar ist.

Eine Optimierungsfunktionalität in der Arbeitssteuerung wird im Rahmen der Arbeiten im Spitzentechnologiecluster „eniPROD“ entwickelt. Diese zielt insbesondere auf die energieoptimale Ansteuerung von Ressourcen in nicht-wertschöpfenden Zeiten. Eine umfassende Kommunikationsarchitektur wird von keinem der oben genannten Autoren vorgenommen. Zur Umsetzung einer solchen Funktionalität ist eine Kommunikation erforderlich, die sowohl horizontal als auch vertikal funktioniert. Auf dieser Basis können Maßnahmen abgeleitet und die Produktion permanent am energetisch bestmöglichen Betriebspunkt gehalten werden.

Zur Erreichung der Zielsetzung dieser Arbeit müssen mehrere betrachtete Schwerpunkte miteinander in Bezug gesetzt werden, um dadurch einen Mehrwert in der energetischen Planung, Bewertung und Optimierung einer Produktion zu erlangen. Hierfür werden bestehende Ansätze verwendet, weiterentwickelt und angepasst. Insbesondere die Ansätze von *Schiefer*, *Weinert*, *Kruska*, *Dietmair* und *Devoldere* liefern Teilaspekte, die zur Zielerreichung beitragen.

In der folgenden zu erarbeitenden Methodik soll daher untersucht werden, wie eine ganzheitliche modellbasierte Methodik zu Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion die

bestehenden Defizite beheben kann. Es werden die peripheren Systeme KSS-Versorgung, Druckluftversorgung, Heizung, Lüftung und Klimatisierung sowie die Beleuchtung berücksichtigt. Die Auswahl dieser Systeme erfolgte anhand des Kriteriums „energetische Relevanz“ (vgl. Abbildung 1-3). Die Beschränkung liegt hierbei auf der Untersuchung einer Produktionshalle in der spanenden Werkstattfertigung mit Bearbeitungszentren.

Im nächsten Kapitel erfolgt die Ableitung von konkreten Lösungsbausteinen.

4 Lösungsbausteine der Methodik zur Planung und Bewertung der Energieeffizienz

Nachdem in Kapitel 2 die Grundlagen und der Stand der Technik erarbeitet wurden und in Kapitel 3 die bestehenden Ansätze in Bezug auf die Planung, Bewertung und Optimierung des energetischen Verhaltens von Fabriken analysiert wurden, werden in Kapitel 4 die Lösungsbausteine für eine „Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion“ erarbeitet.

Durch die für diese Arbeit identifizierten Anforderungen sowie die Untersuchung existierender Ansätze können die Lösungsbausteine

- Modellierung,
- Integration der Arbeitsvorbereitung,
- kennzahlenbasierte Bewertung sowie
- Optimierung

erarbeitet werden, welche im Folgenden bezüglich ihrer Aufgabe, der möglichen Ausgestaltung sowie der Verknüpfung zueinander beschrieben werden.

Lösungsbaustein „Modellierung“

Aufgabe:

Der Lösungsbaustein „Modellierung“ dient dazu, die komplexen Zusammenhänge in der Produktion abzubilden und zu verstehen. Außerdem hat er die Aufgabe, verschiedene Parameterkonstellationen zu untersuchen. Eine Umsetzung dieser ist aufgrund der Vielzahl von Variationsparametern in einer realen Produktion nicht möglich.

Ausgestaltung / Umsetzung:

In einem ersten Schritt werden auf der Basis einer bestehenden Produktion die Ressourcen der Hauptprozesse und die der Peripherie in Modelle überführt und miteinander in Bezug gesetzt. Hierfür ist es erforderlich, Basismodelle zu entwickeln, welche die Zusammenhänge abbilden und berücksichtigen. Dabei wird auf einen systemtechnischen Ansatz zurückgegriffen, der sowohl Energie-, Stoff- als auch Informationsflüsse beinhaltet (vgl. auch Kapitel 2). Es ist außerdem auf eine konsequente Trennung zwischen Prozesssicht und Ressourcensicht zu achten. Die Basismodelle

bilden den statischen Ist-Zustand des zu betrachtenden Systems ab, d.h. die Dimension Zeit wird hierbei nicht berücksichtigt. Diese Modelle werden in einem nächsten Schritt ressourcen- und prozessspezifisch angepasst. Außerdem werden die peripheren Systeme der Produktion mit einbezogen und mit den Basismodellen der Ressourcen der Hauptprozesse in Bezug gesetzt. Das ist von zentraler Bedeutung, da sie für einen Großteil des Energieverbrauchs verantwortlich sein können (vgl. Kapitel 2).

Durch die Wahl eines statusbasierten Ansatzes, bei dem die Status der Ressourcen mit spezifischen Energieprofilen verknüpft werden, kann eine Planung des zukünftigen Energiebedarfs und eine Bewertung verschiedener Parametersätze erfolgen. Der statusbasierte Energieverbrauch wird durch die Integration einer geeigneten Methode ermittelt, mit der sowohl eine Felddatenerfassung als auch Detailmodelle angebunden werden können.

Verknüpfung mit anderen Lösungsbausteinen:

Die umfassende Berücksichtigung des Energiebedarfs stellt den zentralen Schritt zur energieorientierten Planung, Bewertung und Optimierung einer Produktion dar. Daraus folgt, dass in einem weiteren Schritt der Energieverbrauch als explizite Größe sowohl in der Arbeitsplanung als auch in der Arbeitssteuerung zu berücksichtigen ist.

Um die Modelle mit variierenden Vorgaben aus der Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung parametrieren zu können, werden Schnittstellen vorgesehen, die eine Integration von verschiedenen vorgegebenen Parametersätzen ermöglichen. Zusätzlich kann eine vorgegebene Auftragslast bezüglich der energetischen Auswirkungen auf die Produktion hin untersucht werden.

Die statisch erarbeiteten Modelle werden in einer Simulationsumgebung abgebildet und somit in dynamische Modelle überführt.

Lösungsbaustein „Erweiterung und Integration der Arbeitsvorbereitung (AV)“

Aufgabe:

Durch den Lösungsbaustein „Erweiterung und Integration der AV“ wird die Anforderung erfüllt, bereits die Planungsphase in die Energieoptimierung mit einzubeziehen, da hier bereits ein Großteil des späteren energetischen Verhaltens einer Produktion festgelegt wird (vgl. Kapitel 1.1.2). Dem Planer wird dadurch die Möglichkeit gegeben, die Konsequenzen bezüglich des energetischen Verhaltens hinsichtlich getroffener Entscheidungen zu betrachten. Außerdem wird der Aspekt der Auftragsdurchsetzung im Rahmen der Arbeitssteuerung integriert. Dies führt dazu, dass auf die laufende Produktion Einfluss genommen werden kann.

Ausgestaltung / Umsetzung:

In einem ersten Schritt wird eine Funktionalität erarbeitet, mit der auf die Daten und Vorgaben aus der Arbeitsplanung zugegriffen werden kann. Daraus resultiert, dass eine Schnittstelle zur Arbeitsplanung geschaffen wird, die eine Parametrierung der Modelle mit den Planungsvorgaben ermöglicht. Somit kann der Arbeitsplaner bereits frühzeitig Einfluss auf das spätere energetische Verhalten des zu planenden Systems nehmen und ein Gefühl entwickeln, welche Konsequenzen eine getroffene Entscheidung auf das energetische Verhalten hat. Hierbei sind im Rahmen dieser Arbeit insbesondere die Arbeitsplanerstellung und die Operationsplanung im Bereich der kurzfristigen Planungstätigkeiten von Bedeutung.

Die Implementierung einer Methode, mit der die laufende Produktion energetisch effizient betrieben werden kann, erfolgt in einem weiteren Schritt. Dabei wird ein Kommunikationssystem erarbeitet, mit dem eine bidirektionale Kommunikation zwischen übergelagerter Managementebene, Modellen und Ressourcen realisierbar ist.

Um auftretende Ereignisse hinsichtlich ihres energetischen Einflusses bewerten und geeignete Maßnahmen ableiten zu können, werden die Simulationsmodelle mit heterogenen Daten aus der Produktion parametrisiert. Dadurch können verschiedene Szenarien getestet und situationspezifisch bewertet werden.

Verknüpfung mit anderen Lösungsbausteinen:

Die Verknüpfung dieses Lösungsbausteins mit den Modellen stellt eine zentrale Funktionalität der gewählten Methodik dar. Zudem wird eine Schnittstelle zur Bewertungs- und Optimierungsmethodik erarbeitet, mit der geeignete Entscheidungen in die Arbeitsplanung sowie in der Arbeitssteuerung zurückgeführt werden können.

Lösungsbaustein „Kennzahlensystem zur Bewertung“

Aufgabe:

Um alternative Szenarien durch Simulationsergebnisse verschiedener Parametersätze beurteilen zu können, wird ein Kennzahlensystem verwendet, das mit den Modellen gekoppelt ist. Dadurch können Aussagen bezüglich des energetischen Verhaltens einer Produktion in verdichteter Form getroffen werden.

Ausgestaltung / Umsetzung:

Das Kennzahlensystem wird mit multikriterieller Ausrichtung umgesetzt: Neben der reinen Betrachtung der Energie werden zusätzlich Kennzahlen berücksichtigt, die Aussagen zur Durchlauf-

zeit und zur Qualität zulassen. Diese Kennzahlen der verschiedenen Zieldimensionen stellen die Grundlage für den Lösungsbaustein „Optimierung und Maßnahmenableitung“ bereit.

Die Kennzahlenermittlung erfolgt „bottom-up“, d.h. sie werden ausgehend von den einzelnen beteiligten Ressourcen auf den gesamten Bilanzraum hochgerechnet.

Da der Lösungsbaustein „Modellierung“ nicht zwingend alle erforderlichen Daten für das Kennzahlensystem liefert, werden Handlungsempfehlungen zur Datenerfassung und Datenbereitstellung erarbeitet.

Verknüpfung mit anderen Lösungsbausteinen:

Für die Kennzahlenberechnung ist eine Verknüpfung mit dem Lösungsbaustein „Modellierung“ erforderlich, da eine Vielzahl von Daten benötigt wird. Außerdem ist eine Kommunikation mit dem Lösungsbaustein „Optimierung und Maßnahmenableitung“ für die Bestimmung und Übergabe des situationsoptimalen Parametervektors wichtig.

Lösungsbaustein „Optimierung und Maßnahmenableitung“

Aufgabe:

Der Lösungsbaustein „Optimierung und Maßnahmenableitung“ hat im Rahmen der gewählten Methodik die Aufgabe, auf der Basis des Kennzahlensystems durch eine Gütefunktion den bestmöglichen Parametersatz zu ermitteln und an die Ressourcen oder die Arbeitsplanung zu übergeben.

Ausgestaltung / Umsetzung:

Dieser Lösungsbaustein wird in die Optimierung im Rahmen der Arbeitsplanung („Planungskreis“) und die Optimierung im Rahmen der Arbeitssteuerung („Steuerungskreis“) unterteilt:

Die Maßnahmenableitung im Rahmen der Arbeitsplanung zielt darauf ab, die Parameter der Plandaten in der Weise zu wählen, dass der energetisch beste Parametersatz ermittelt und an die Arbeitsplanung zurückgegeben wird.

Bei der Erweiterung der Arbeitsteuerung werden Methoden entwickelt, mit denen die Fertigung permanent am energetisch bestmöglichen Betriebspunkt gehalten werden kann sowie Lastspitzen vermieden werden können. Hierfür wird die elektrische Energie als explizite Steuerungsgröße in die Arbeitsablaufplanung integriert. Es ist erforderlich, eine Kommunikationsmethode zu entwickeln, welche den permanenten Datenaustausch zwischen der Fertigung und der übergeordneten Leitebene ermöglicht. Hierbei müssen horizontale und vertikale Kommunikationswege einbezogen werden (vgl. Kapitel 2). Außerdem wird ein Ansatz erarbeitet, mit denen eine Eskalation der verschiedenen Nachrichten und somit eine geeignete Maßnahmenableitung in Bezug auf die Arbeitssteuerung durchgeführt werden kann.

Zusätzlich wird darauf geachtet, dass die Energie nicht isoliert von den klassischen Zielgrößen der Produktion betrachtet wird, sondern dass diese Ziele in die Bewertung mit einfließen.

Verknüpfung mit anderen Lösungsbausteinen:

Der Lösungsbaustein „Optimierung und Maßnahmenableitung“ kommuniziert mit sämtlichen anderen Lösungsbausteinen:

Das Kennzahlensystem liefert (auf Basis der Modellierung) die Datengrundlage zur Bildung der Gütefunktion und die Erweiterung der AV legt die zu variierenden Parameter in der Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung fest.

5 Umsetzung der Methodik zur Planung und Bewertung der Energieeffizienz

5.1 Aufbau der Methodik

Die folgende Abbildung 5-1 ordnet beschriebenen Lösungsbausteine auf Basis der in Kapitel 4 definierten Aufgaben und Verknüpfungen zueinander in den Gesamtzusammenhang ein und stellt eine Methodik für einen Planungs-, Bewertungs- und Optimierungsansatz der Energieeffizienz in der Produktion dar.

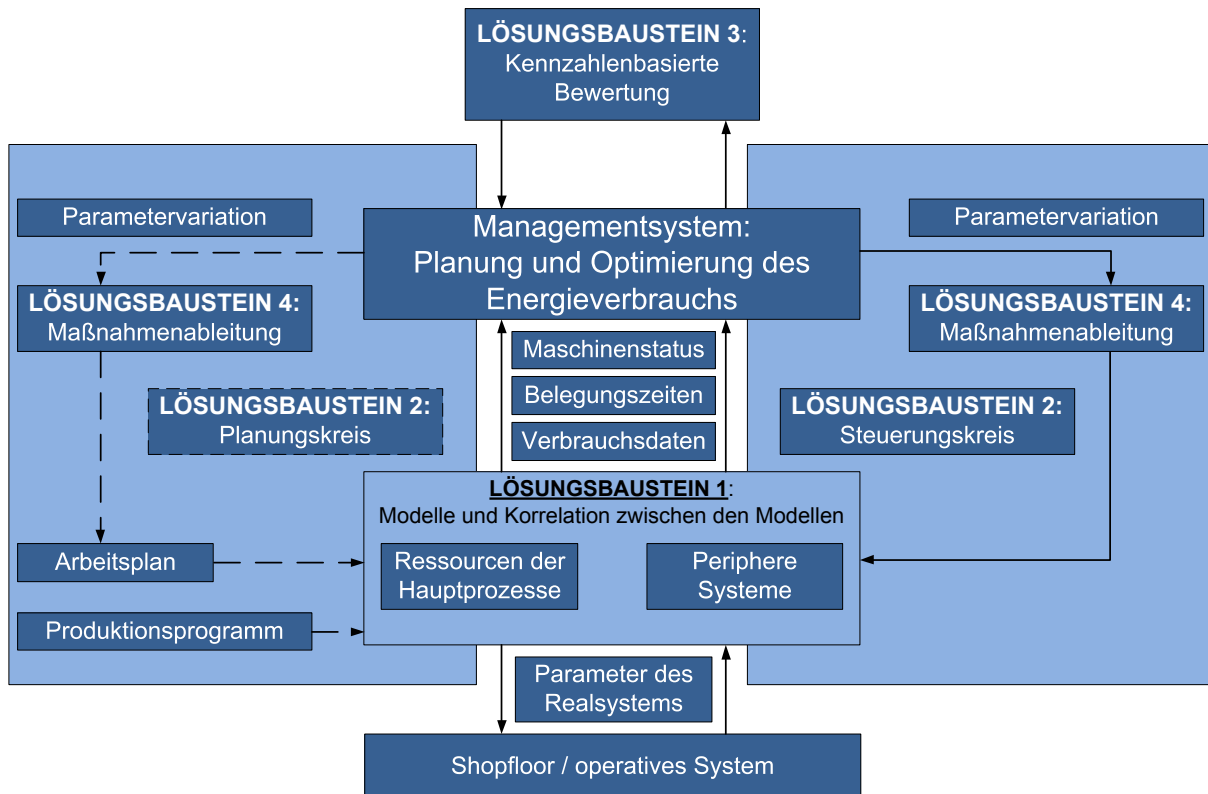


Abbildung 5-1: Methodik zur Planung, Bewertung und Optimierung

Die folgenden Kapitel beschreiben die einzelnen Lösungsbausteine detailliert (vgl. Abbildung 5-1) und stellen Methoden sowie Werkzeuge vor, die den Anwender bei der energetischen Planung, Bewertung und Optimierung unterstützen.

5.2 Modellierung

Die Modellierung der Partialsysteme und die Erstellung des Gesamtmodells erfolgt auf Basis der Systemtheorie. Dieser interdisziplinäre Ansatz erlaubt die Darstellung der Wirkzusammenhänge zwischen den beteiligten Systemen und bildet somit die Grundlage für die Modellierung (vgl. Kapitel 2). Ausgehend von einem existierenden, operativen System werden Modelle und die Korrelationen zwischen den Modellen abgeleitet. Die Modellierung erfolgt statusbasiert. Hierbei gilt es, sowohl die peripheren Systeme als auch die Ressourcen der Hauptprozesse zu berücksichtigen. Zum operativen System werden die Modelle über Schnittstellen zur Felddatenerfassung angebunden, mit der sie parametrisiert werden können. Nach oben werden Sie zu einer übergelagerten Managementebene angebunden. Diese Managementebene dient als Datenhub und erfasst z.B. Maschinenstatus, Belegungszeiten und Verbrauchswerte der modellierten und simulierten Szenarien (vgl. Abbildung 5-2).

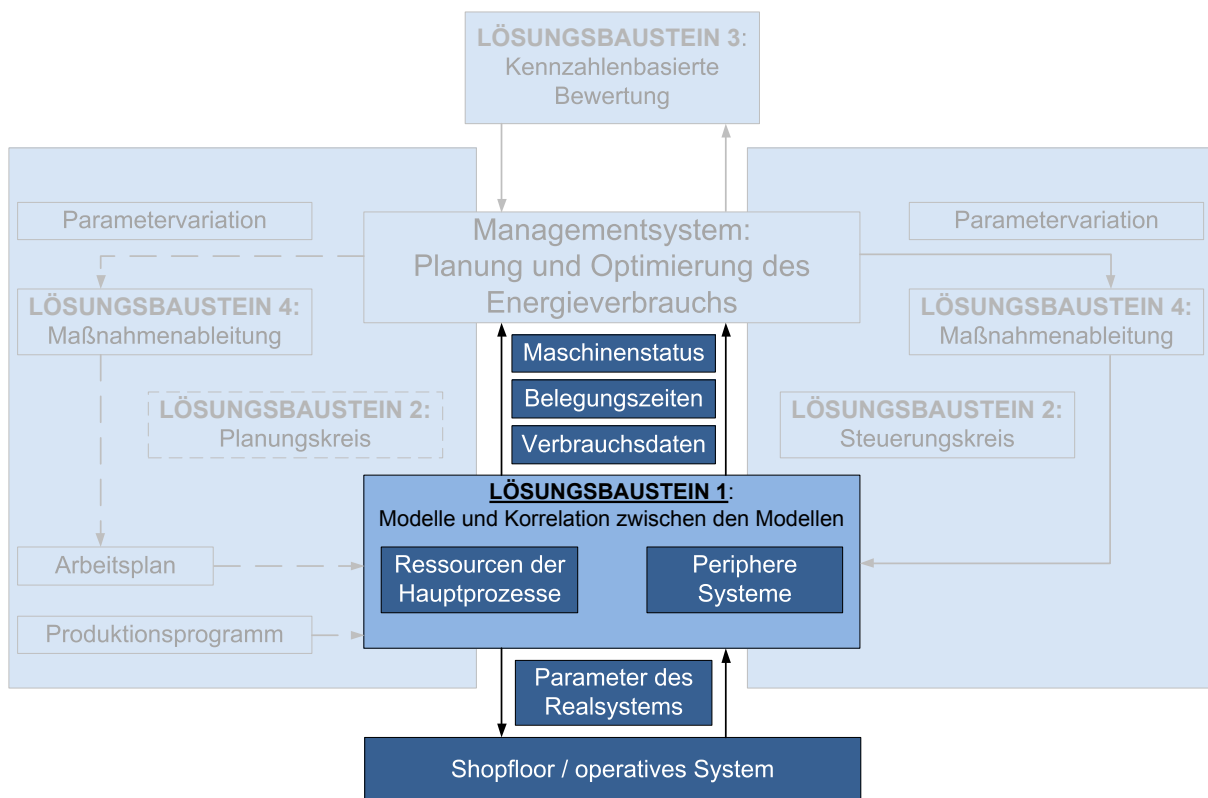


Abbildung 5-2: Lösungsbaustein „Modellierung“ im Kontext der Methodik

5.2.1 Vorgehensweise der statusbasierten Modellierung von Ressourcen

Im ersten Schritt der statischen Modellierung steht die Identifikation der Zusammenhänge und Wechselwirkungen der vorhandenen Ressourcen im Vordergrund. Diese bildet die Grundlage für die darauf aufbauende dynamische Modellierung und Simulation. Die statische Modellierung verfolgt somit das Ziel, die relevanten Zusammenhänge der Ressourcen systematisch zu verstehen und darzustellen. Hierbei gilt es, sowohl die Informationen als auch die Energie- und Stoffströme zu berücksichtigen. Außerdem können geeignete Steuergrößen frühzeitig identifiziert werden. In diesem Schritt können Teile der Energie- und Stoffmodelle von *Schiefer* verwendet werden, der eine umfangreiche Untersuchung der energetischen Zusammenhänge in der spanenden Fertigung durchgeführt hat (vgl. Kapitel 3).

Da für die energetische Betrachtung das dynamische Verhalten eine wesentliche Rolle spielt, müssen in einem weiteren Schritt die statischen Modelle um den Faktor Zeit erweitert und so in dynamische Modelle überführt werden. Dies erfolgt durch einen statusbasierten Ansatz, der auf der Grundidee von *Dietmair* (vgl. Kapitel 3) basiert und um die zeitliche Dimension erweitert wird. Hierbei kann zusätzlich auf der Vorgehensweise von *Weinert* aufgebaut werden, der den Ansatz von *Dietmair* aufgegriffen und erweitert hat (vgl. Kapitel 3).

Im hier entwickelten Ansatz werden die Zustände der Ressourcenmodelle mit Energieprofilen verknüpft. Die Voraussetzung hierfür ist, dass jedes Ressourcenmodell über eindeutig definierte Status verfügt. Es werden mehrere verschiedene Standardzustände unterschieden, welche die Ressourcen der Hauptprozesse und der Peripherie einnehmen können. Eine spezifische Anpassung oder Erweiterung der Zustände ist möglich.

Die Zustände dienen zur Charakterisierung des Betrachtungsgegenstands. Im Allgemeinen setzt sich jeder Zustand einer Ressource aus einer Kombination von Subsystemen zusammen, die ebenfalls jeweils einen eindeutigen Zustand einnehmen.

Der Vorteil dieser Methodik liegt in der Tatsache, dass den betrachteten Ressourcen zu jedem beliebigen Zeitpunkt ein eindeutiger Zustand zugewiesen werden kann. Die Anzahl der vorhandenen Zustände ist von der betrachteten Ressource abhängig und wird in der frühen Phase der Modellierung festgelegt.

Folgende Vorgehensweise für die Modellierung der Ressourcen ist im Rahmen dieser Arbeit ziel führend:

1. Ermittlung der spezifischen, zur Verfügung stehenden Status jeder betrachteten Ressource

2. Ermittlung des Energiebedarfs für jeden Status. Der Energieverbrauch kann auf Basis von Felddaten, Erfahrungswissen oder Modellen erfasst werden. Heterogene Datenquellen können durch die „Factory Energy Information Description Language“ („F-EIDL“) zur Verfügung gestellt werden (vgl. Abschnitt 5.2.5).
3. Erfassung der Zeitanteile, in welcher die jeweiligen Status anliegen. Das kann auf Basis von Vorgabezeiten aus der Arbeitsplanung oder von Felddaten geschehen. Hierbei ist in jedem Fall auf eine durchgängige Einteilung der Belegungszeiten zu achten. In der Arbeitsplanung werden nach REFA Verteilzeiten zugeschlagen. Diese sind im Rahmen der Arbeitssteuerung durch tatsächliche Zeiten zu ersetzen (vgl. Kapitel 2).
4. Optional erfolgt eine Berücksichtigung der Zeitspannen und des Energiebedarfs der Zustandswechsel. Bei sehr kurzen Wechselzeiten und geringer energetischer Dynamik beim Zustandswechsel können die Wechselintervalle vernachlässigt werden.
5. Festlegen der Bilanzgrenze und Erarbeiten der Wirkzusammenhänge zwischen den beteiligten Ressourcen der Hauptprozesse und der Peripherie (Stoff-, Energie- und Informationsflüsse)
6. Modellableitung: das betrachtete System muss hinreichend genau in den Modellen repräsentiert werden
7. Abschließende Berechnung des Energiebedarfs des Systems im Betrachtungszeitraum

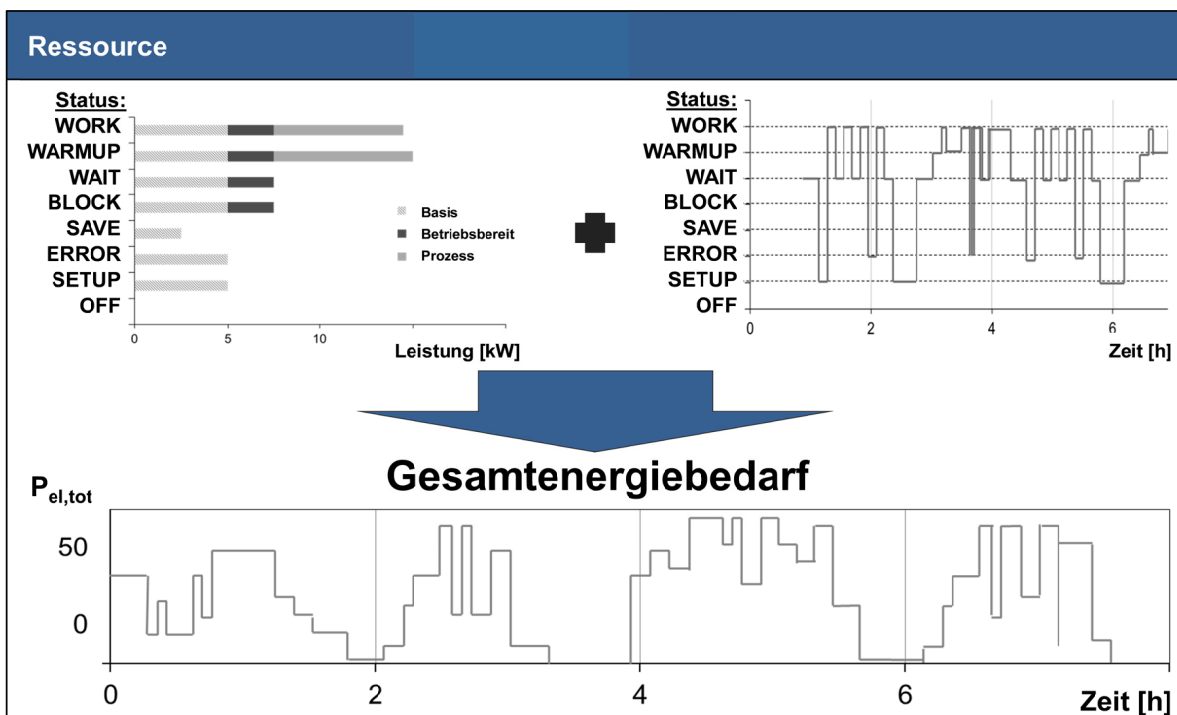


Abbildung 5-3: Statusbasierte Modellierung der Ressourcen

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass jedem verfügbaren Maschinenstatus eine charakteristische Leistungsaufnahme zugeordnet werden kann. Durch die Bildung des Integrals über die Zeit, in welcher der Zustand anliegt, kann der Energieverbrauch errechnet werden (vgl. Abbildung 5-3).

Der Modellierungsansatz und die Vorgehensweise eignen sich sowohl als Grundlage für die Planung als auch für die Bewertung und Optimierung des energetischen Verhaltens in der Produktion.

5.2.2 Modellierung der Partialsysteme für die Hauptprozesse

Eine Werkzeugmaschine setzt sich im Wesentlichen aus den energetisch relevanten Komponenten Hauptspindel mit Werkzeug und Werkzeugaufnahme, KSS-System (bei dezentraler KSS-Versorgung), Achsen, Steuerung/Schaltschrank und Hydraulik zusammen, welche einen spezifischen Energiebedarf haben und zusammen für den ressourcenspezifischen Energieverbrauch verantwortlich sind. Zusätzlich wird Energie für die Durchführung des Bearbeitungsprozesses benötigt (vgl. Kapitel 3). Dieser Einflussfaktor entspricht dem prozessspezifischen Energieverbrauch. Jeder Zustand der Ressource ist eine Kombination der Zustände der Teilsysteme, die sich jeweils z.B. im Zustand „arbeitend“ oder „nicht arbeitend“ befinden können. Im Rahmen des gewählten Ansatzes bildet eine einzelne Ressource der Hauptprozesskette die kleinste zu betrachtende Einheit. Das bedeutet, auf der Betrachtungsebene „Ressource der Hauptprozesse“ werden die Zustände der einzelnen Ressourcen für die Modellierung benötigt, die in der folgenden Tabelle 5-1 dargestellt sind. Durch die Betrachtung der Fertigungsressourcen als Black-Box werden bei der Modellierung keine Subsysteme der Maschinen explizit berücksichtigt.

Im Rahmen der Arbeiten in der DFG Forschergruppe „ECOMATION“ wurden folgende Status für die Modellierung der Ressourcen der Hauptprozesse definiert, die auf die betrachteten Prozesse der Hauptressourcen (Drehen und Fräsen) angewandt werden können. Sie werden im Folgenden detailliert beschrieben (vgl. Kapitel 3), (vgl. Tabelle 5-1):

Tabelle 5-1: Definierte Status für die Modellierung der Ressourcen der Hauptprozesse

Bezeichnung	Beschreibung der Zustände
WORK	Ressource in Betrieb / Online
WARMUP	Ressource fährt an / Warmlauf / Hochlauf des Systems
WAIT	Ressource wartet auf Systemeingabe
BLOCK	Ressource blockiert

ERROR	Unterbrechung des Betriebs / Fehler / Störung
SETUP	Ressource wird eingerichtet / umgerüstet / konfiguriert
OFF/STANDBY	Ressource außer Betrieb / Offline / Standby
SAVE	Energiesparmodus

1. WORK: In diesem Zustand arbeitet die Ressource. Der Zustand bleibt bis zum Ende der Bearbeitungszeit erhalten, wenn nicht während der Bearbeitung eine Störung oder ein Rüstvorgang eintritt.
2. WARMUP: In diesem Zustand wird die Ressource in Betriebsbereitschaft (z.B. auf Betriebstemperatur) gebracht.
3. WAIT: In diesem Zustand ist die Ressource betriebsbereit und wartet auf ein zu bearbeitendes Werkstück. Die Ursache für diesen Zustand kann z.B. eine Störung oder eine höhere Taktzeit an der vorgelagerten Ressource oder dem intralogistischen System sein, welches für die Materialbereitstellung verantwortlich ist. Die Ressource „wartet“ auf ein zu bearbeitendes Teil. Dieser Zustand ist folglich von dem dynamischen Verhalten des Gesamtsystems abhängig.
4. BLOCK: In diesem Zustand kann die Ressource nicht produzieren, da kein Werkstückabtransport stattfindet. Das ist der Fall, wenn die nachfolgende Ressource oder bestehende Puffer voll oder blockiert sind. Auch dieser Zustand ist folglich vom dynamischen Verhalten des Gesamtsystems abhängig.
5. ERROR: In diesem Zustand stellt die Ressource die Ursache des Problems dar, es liegt ein Fehler vor. Diese Störzeiten können z.B. durch Werkzeugbrüche, Verklemmungen oder Sensorikprobleme verursacht werden.
6. SETUP: In diesem Zustand wird die Maschine eingefahren und arbeitet nicht. Dieser Zustand tritt z.B. bei einer Änderung des NC-Programms auf oder wenn die Ressource für ein neue Variante gerüstet bzw. ein neues Teil eingelegt wird.
7. OFF/STANDBY: In diesem Zustand ist die Ressource ausgeschaltet oder im Standby-Modus und steht nicht sofort zur Verfügung.
8. SAVE: Optionaler Energiesparmodus. Dieser Zustand kann dazu dienen, die Maschine in einen energieoptimalen Status zu setzen.

Bei der Auswahl der Zustände gilt es zu beachten, dass nicht alle der oben genannten Zustände bei der Modellierung einer Ressource vorhanden sein müssen, da insbesondere ältere Maschinen häufig nicht über diese Vielzahl von möglichen Zuständen verfügen.

In den spezifischen Zuständen hat die Ressource eine unterschiedlich hohe Leistungsaufnahme: So ist es naheliegend, dass die Leistungsaufnahme eines Bearbeitungszentrums im Zustand „WORK“ höher ist als im Zustand „WAIT“ oder „BLOCK“, da die Hauptspindeln nur laufen, wenn auch zerspannt wird.

Durch die Trennung zwischen Prozess- und Ressourcensicht kann der Gesamtenergiebedarf nach folgender Formel berechnet werden:

$$W_{\text{Hauptprozess}} = W_{\text{Prozess}} + W_{\text{Ressource}} \quad \text{Formel 5-1}$$

Die energetische Komponente W_{Prozess} tritt nur im Status „WORK“ auf und wird im Abschnitt 5.4.1 detailliert untersucht. Die Komponente $W_{\text{Ressource}}$ ist in jedem Zustand (außer bei ausgeschalteter Ressource) zu berücksichtigen, da sie den Grundverbrauch der Ressource beschreibt. Auch dieser Einflussfaktor auf den Gesamtenergieverbrauch wird in Abschnitt 5.4.1 näher betrachtet.

5.2.3 Modellierung der Partialsysteme für die Peripherie

Um das energetische Verhalten einer Produktion modellieren zu können, werden nicht nur die Ressourcen der Hauptprozesse, sondern zusätzlich die peripheren Systeme berücksichtigt. Die Grundlage hierfür bildet die Klassifikation und Einordnung der betrachteten Systeme in ihre periphere Ordnung. Hierbei wird auf dem Peripheriemodell von *Schenk und Wirth* aufgebaut (vgl. Kapitel 2). Es eignet sich im Rahmen dieser Arbeit für eine systematische Analyse sowie für die Verknüpfung der beteiligten peripheren Subsysteme (Ressourcen) über Kausalzusammenhänge. Darauf aufbauend werden die verfügbaren Status der jeweiligen Ressourcen identifiziert. Die Methodik zur statusbasierten Modellierung der Ressourcen der Hauptprozesse (vgl. vorherigen Abschnitt) kann hierbei nur in adaptierter Form angewandt werden, da periphere Systeme häufig nicht über die Vielzahl der quantifizierbaren Zustände nach Tabelle 5-1 verfügen, die mit Energieprofilen verknüpft werden können. Die folgende Abbildung 5-4 stellt die betrachteten peripheren Systeme dar und gliedert sie in ihre periphere Ordnung.

In Abhängigkeit der peripheren Ordnung können die zustandsbasierten Steuergrößen auf die entsprechenden Systeme ermittelt werden. Bei der Modellierung der Peripherie ist zu beachten, dass die Einflussgrößen auf das Verhalten der Peripherie variieren. In der größten Modellierungsstufe

handelt es sich bei der Einflussgröße von Systemen der ersten Peripherie um das Produktionsprogramm (Aufträge) und bei Systemen der zweiten Peripherie um den Zustand der Ressourcen der Hauptprozesse. Systeme der dritten Peripherie sind insbesondere von den Arbeitszeiten bzw. dem gewählten Schichtsystem abhängig (vgl. Kapitel 2).

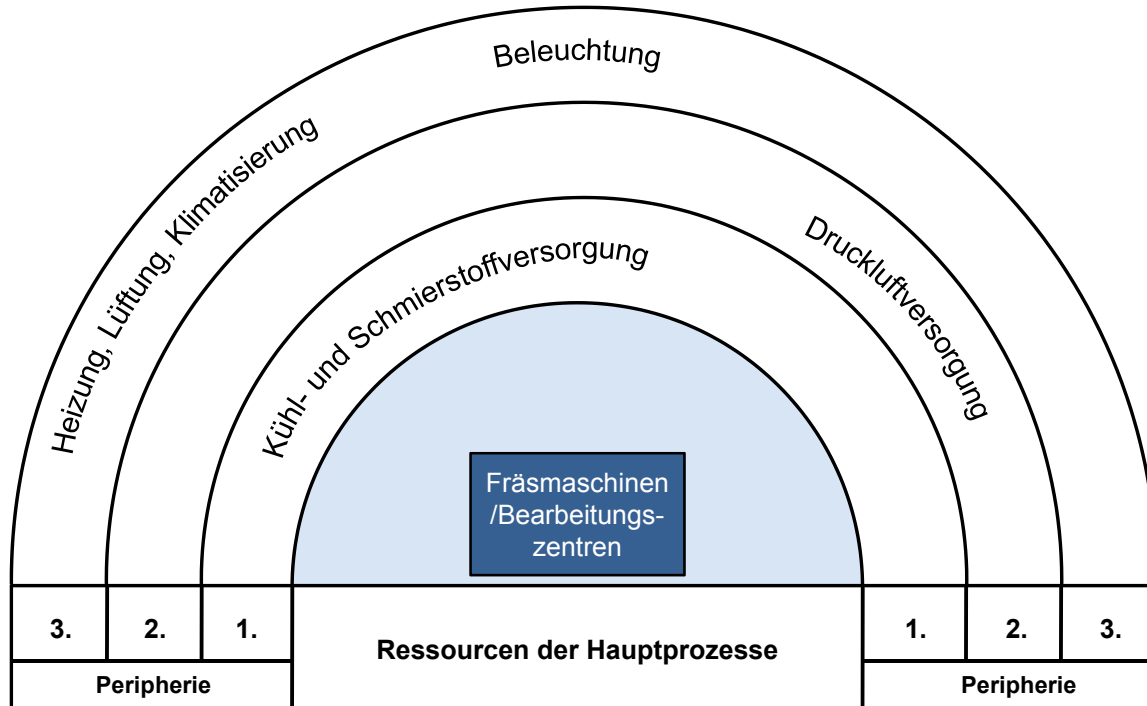


Abbildung 5-4: Gliederung der berücksichtigten peripheren Systeme (Einteilung nach [Schenk/Wirth 2004])

Im Folgenden werden die betrachteten peripheren Systeme genauer beschrieben und in ein abstrahiertes Modell überführt, um darauf aufbauend ein Beschreibungsmodell zu entwickeln:

5.2.3.1 Peripherie ersten Grades

KSS-Versorgung

Die Kühlschmierstoffbereitstellung und –aufbereitung ist direkt vom Produktionsprogramm oder vom Zustand der Fertigungsressourcen abhängig. KSS-Systeme können entweder eine dezentrale oder zentrale Bauart aufweisen (vgl. Kapitel 2). Bei der dezentralen Ausführung ist die gesamte KSS-Versorgung in der Maschine untergebracht und im Rahmen des gewählten Ansatzes als Maschinenkomponente zu betrachten, d.h. in diesem Fall wird das KSS-System nicht der Peripherie zugeordnet. Im weiteren Verlauf wird folglich nur die Ausführung als Zentralsystem betrachtet.

Die größten Verbraucher im KSS-System sind die Pumpen, die das Kühlschmiermittel transportieren und für den benötigten Betriebsdruck und Volumenstrom sorgen (vgl. Kapitel 2). Da die KSS-

Anlagen als Zentralkreislaufsystem mehrere Maschinen versorgen, können die Zustände nicht direkt von denen der Hauptprozesse übertragen werden. Vielmehr sind die KSS-Verbraucher als Kollektiv anzusehen, die einen direkten Einfluss auf das KSS-System haben. Je nach Anzahl der aktiven Verbraucher bzw. der Verteilung der Zustände der Hauptressourcen ist es möglich, spezifische Zustände für das KSS-System abzuleiten, da der geforderte Volumenstrom im Zentralsystem variiert. Die Modellierung des KSS-Zentralsystems erfolgt durch die Berücksichtigung der vier Hauptbaugruppen Kühlung, Vorlauf, Rücklauf und Reinigung (vgl. Abbildung 2-6 in Kapitel 2):

Der Vorlauf erfolgt mittels einer oder mehrerer Pumpen, die drehzahlregelt sind, d.h. die Leistungsaufnahme erfolgt in Abhängigkeit des benötigten Volumenstroms. Auch für den Rücklauf werden Pumpen eingesetzt, die geregelt werden. Die Druckfilteranlagen bestehen aus Förderpumpen, welche ebenfalls eine Anpassung der Leistungsaufnahme in Abhängigkeit des Volumenstroms zulassen. Das Kühlsystem besteht häufig aus Konstantförderpumpen, welche keine Anpassung der Leistungsaufnahme ermöglichen.

Die Betrachtung der Hauptbaugruppen macht deutlich, dass die Zustände des KSS-Systems stark von der gewählten Bauart der Komponenten abhängen. Außerdem ist die Anzahl der KSS-Verbraucher von zentraler Bedeutung. Die oben getroffenen Annahmen führen zu einer Festlegung von KSS-spezifischen Zuständen.

Die Abbildung 5-5 verdeutlicht exemplarisch die Leistungsaufnahme der vier Hauptkomponenten in Abhängigkeit des geforderten Volumenstroms.

Ein Aufsummieren der einzelnen Komponenten des KSS-Systems erlaubt die Modellierung einzelner Teillastbereiche. Abbildung 5-6 stellt das Ergebnis für 3 gleichartige Verbraucher bei der zentralen KSS-Anlage dar.

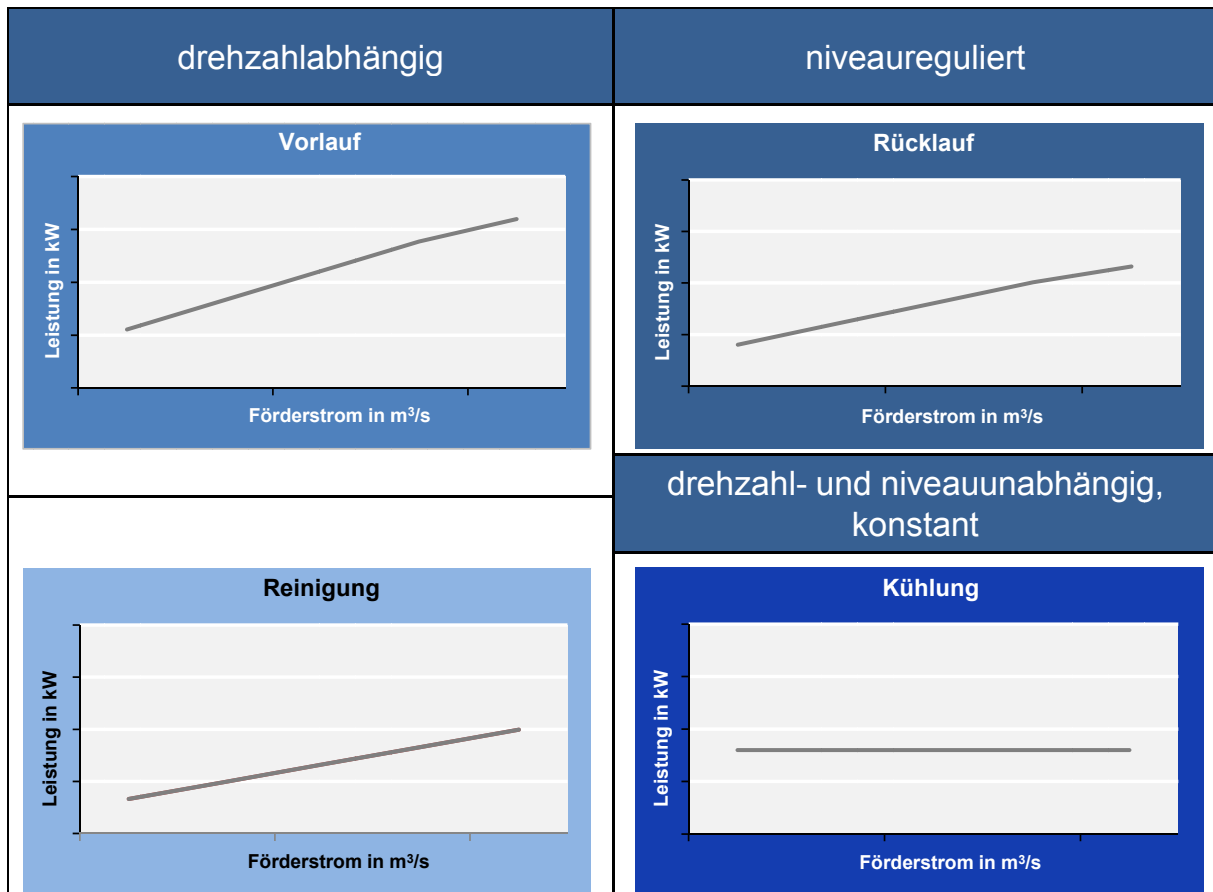


Abbildung 5-5: Modellierung der KSS-Anlage (1)

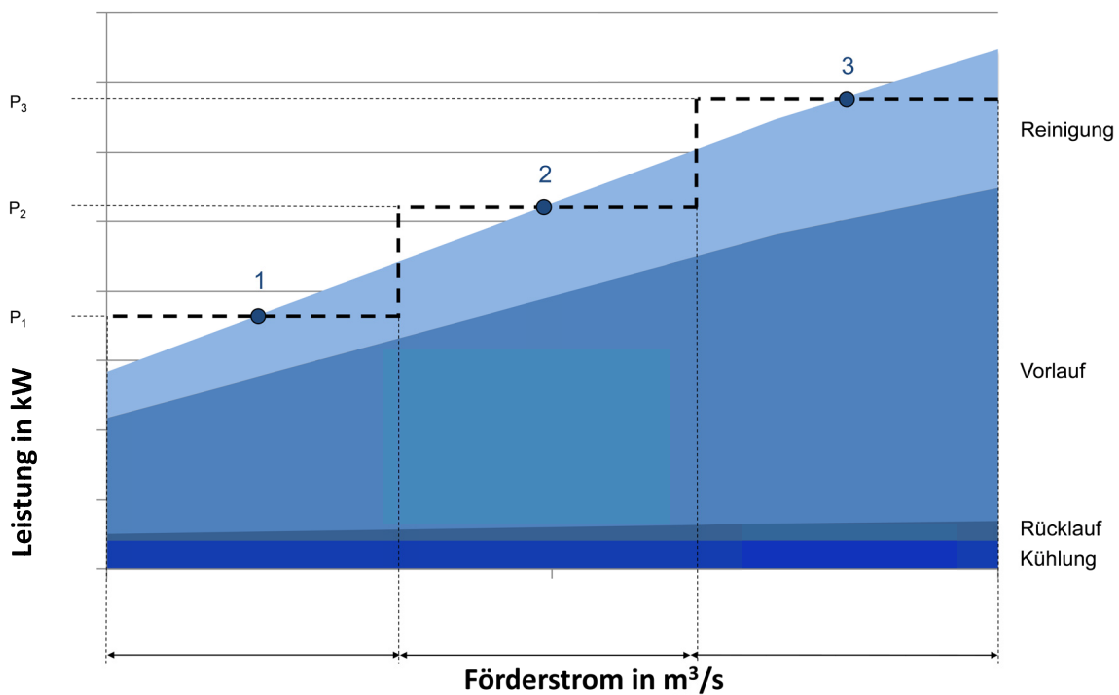


Abbildung 5-6: Modellierung der KSS-Anlage (2)

Als generischer Ansatz erfolgt daraus resultierend eine Modellierung der folgenden KSS-spezifischen Zustände (vgl. Tabelle 5-2):

Tabelle 5-2: mögliche Zustände des KSS Systems

System KSS Bereitstellung
WARMUP (Hochlauf)
WORK (Teillast 1)
WORK (Teillast 2)
WORK (Teillast 3) = Volllast
Wochenendbetrieb

1. WARMUP (Hochlauf): Dieser Zustand wird im Allgemeinen 2-3 Stunden vor Beginn der Produktion eingenommen, um das System auf das geforderte Temperaturniveau zu bringen und einen eingeschwungenen, stationären Zustand zu erreichen.
2. WORK (Teillast 1-3): Die Einteilung in die drei Teillastbereiche muss nach unternehmensspezifisch klar definierten Kriterien erfolgen und hängt im Allgemeinen von dem aktuell geforderten Volumenförderstrom der Zentralanlage ab. Dieser hängt wiederum von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab (z.B. Anzahl der Verbraucher, Spannvolumen, Schnittgeschwindigkeit der Bearbeitungsmaschinen). Die Teillastbereiche unterscheiden sich in der Leistungsaufnahme der geregelten Pumpen für Vorlauf, Rücklauf und Kühlung (vgl. Abbildung 5-5). Im Teillastbereich 3 arbeitet das KSS-System unter der maximal vorgesehenen Volllast, d.h. dem maximal möglichem Förderstrom bei gegebenem Druck.
3. Wochenendbetrieb: Der Status „Wochenendbetrieb“ wird während sämtlicher Freischichten eingenommen, wenn die Anlage sich nicht im Hochlauf befindet. Dieser Zustand dient insbesondere der Anlagen- und KSS-Pflege. Die Öl-Wasser Emulsion wird vor Bakterienbefall geschützt, in dem in konstanten Zeitintervallen eine Zirkulation der KSS-Emulsion durchgeführt wird. Die Emulsion darf nicht über ein längeres Zeitintervall stehen. Aus diesem Grund wird bei der Modellierung der KSS-Anlage nicht der Zustand „OFF/STANDBY“, sondern der Zustand „Wochenendbetrieb“ verwendet.

Weitere Parameter und Einflussgrößen können anhand der Ausführungen in Kapitel 2 integriert werden.

5.2.3.2 Peripherie zweiten Grades

Druckluftversorgung

Das Druckluftversorgungssystem, welches zentral mehrere Ressourcen versorgt, muss permanent den erforderlichen Druckluftvolumenstrom bereitstellen. Bei diesem Versorgungssystem handelt es

sich um ein typisches System der ersten oder zweiten Peripherie, da es entweder vom Zustand der Hauptressourcen oder direkt vom Produktionsprogramm abhängig sein kann. Im Rahmen der Modellierung sind Leckage-Verluste zu integrieren, die bei der Druckluftbereitstellung eine nicht zu vernachlässigende Größenordnung annehmen können (vgl. Kapitel 2). Außerdem gilt es zu berücksichtigen, dass im Gegensatz zur KSS-Versorgung im Normalfall Druckspeicherbehälter eingesetzt werden können. Diese Tatsache hat zur Folge, dass das energetische Verhalten des Druckluftkompressors in diesem Fall nicht unmittelbar mit den Ressourcen der Hauptprozesse in Abhängigkeit steht, da der Kompressor diskontinuierlich arbeitet: Bei einem Druckabfall unter einen bestimmten Grenzwert wird der Druckspeicher vollständig aufgefüllt.

Die Druckluftanlage besteht im Wesentlichen aus zwei energierelevanten Verbraucherarten, den Kompressoren und dem Entfeuchter. Zusätzlich kann die Kühlung der Anlage als energierelevant angesehen werden. Da diese jedoch häufig mittels Öl/Wasser-Wärmetauscher über den Wasserkreislauf des Gebäudes erfolgt, wird sie nicht weiter berücksichtigt.

Der Entfeuchter stellt einen permanenten Verbraucher da, die Kompressoren hingegen werden zusammen oder getrennt zugeschaltet, wenn der Druck im Speicherkessel unter einen festgelegten Grenzwert fällt.

Die grundlegende statusbasierte Modellierung kann folglich durch die Zustände in Tabelle 5-3 durchgeführt werden. Es ist jedoch anzumerken, dass ein Großteil der Druckluftversorgungsanlagen als Einkompressorsystem ausgeführt wird. In diesem Fall ist kein Zustand für den Teillastfall vorhanden.

Tabelle 5-3: mögliche Zustände der Druckluftversorgung

System Druckluftbereitstellung
WORK
WORK (Teillast 1)
STANDBY mit Grundlast
OFF

1. WORK: In diesem Zustand arbeiten die Kompressoren und der Entfeuchter der Druckluftversorgung. Der Speicherkessel wird aufgefüllt.
2. WORK (Teillast 1): Optionaler Teillastzustand der Druckluftversorgungsanlage. Dieser Zustand kann z.B. zur Modellierung von Mehrkompressorensystemen verwendet werden. Mehrkompressorensysteme kommen z.B. bei der Lastaufteilung in einen kleinen Spitzenlastkompressor und einen größeren Grundlastkompressor zum Einsatz.

3. STANDBY mit Grundlast: In diesem Zustand ist das System vollständig im Grundlastbetrieb. Nur der Entfeuchter als Permanentverbraucher läuft.
4. OFF: In diesem Zustand ist das System vollständig ausgeschaltet.

5.2.3.3 Peripherie dritten Grades

Beleuchtungsanlagen

Beleuchtungsanlagen können bezüglich ihres Energieverbrauchs im Allgemeinen während der Schichtzeit als konstant angenommen werden und sind direkt vom Schichtsystem abhängig. Diese Tatsache erlaubt die Einteilung in die dritte periphere Ordnung. Externe Einflüsse wie z.B. jahreszeitliche Änderungen müssen nur bei sehr langen Betrachtungszeiträumen berücksichtigt werden. Die möglichen Zustände des Beleuchtungssystems sind unternehmensspezifisch festgelegt, häufig ist folgende Konfiguration anzutreffen (vgl. Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: mögliche Zustände des Beleuchtungssystems

Beleuchtung
WORK
WORK (Teillast 1)
OFF

1. WORK: Im Zustand „WORK“ arbeitet die Beleuchtungsanlage mit einer konstanten Leistungsaufnahme. Das ist im Allgemeinen während der Schichtzeit und in einer Übergangszeit zur Freischicht der Fall.
2. WORK (Teillast 1): Der Zustand „WORK (Teillast1)“ beschreibt eine teilweise Abschaltung der Beleuchtungsanlagen (z.B. Notbeleuchtung nachts oder in Freischichten).
3. OFF: In diesem Zustand ist das Beleuchtungssystem vollständig ausgeschaltet. Ein Standby-Modus, analog zu den anderen betrachteten Systemen, ist im Allgemeinen nicht vorhanden.

HLK Anlagen

Die Abbildung von HLK-Systemen in einem Modell ist komplex, da die Anlagen sehr spezifisch sind und eine große Anzahl von Einflussgrößen aufweisen. Zum Beispiel können Standort, Lage, technologische Parameter der Gebäudehülle und jahreszeitliche sowie tageszeitliche Temperaturschwankungen einen Einfluss auf das System haben. Außerdem haben Abwärmeströme von Anlagen und die Anzahl der Mitarbeiter einen Einfluss auf die Temperatur im Bilanzraum und somit auch auf die HLK-Systeme. Durch diese Tatsache können HLK-Systeme der zweiten Peripherie zugeordnet werden. Bleiben die Wechselwirkungen zwischen den Ressourcen und dem HLK-System unberücksichtigt, ist auch eine Zuordnung in die dritte periphere Ordnung möglich.

Um die vorhandenen Teilfunktionalitäten untersuchen zu können, kann das HLK-System nicht als Ganzes betrachtet werden. Es erfolgt eine Aufteilung in die Subsysteme Kühlung, Heizung und Luftförderung (Lüftung). Diese drei Subsysteme werden bezüglich ihres energetischen Verhaltens und Status separat voneinander betrachtet, d.h. für jedes Subsystem sind spezifische Status und Einflussparameter zu bestimmen. Diese Vorgehensweise ist zielführend, da die Subsysteme auch unabhängig voneinander arbeiten können, so ist z.B. eine Lüftung durch Zu- und Abluftventilatoren möglich, ohne dass die Kühlung oder die Heizung arbeiten.

Zusätzlich gilt es zu beachten, dass Heizung und Klimatisierung im Normalfall nicht durch elektrische Energie, auf die diese Arbeit fokussiert, betrieben werden. In diesem Fall sind die Energieinhalte der verwendeten Energieträger durch Tabelle 7-1 im Anhang zu bestimmen.

Die Zustände der HLK-Subsysteme können der Tabelle 5-5 entnommen werden und sind nachfolgend beschrieben:

Tabelle 5-5: mögliche Zustände des HLK-Systems

HLK-System		
Lüftung	Kühlung	Heizung
WORK	WORK	WORK
WORK (Teillast 1)	WORK (Teillast 1)	WORK (Teillast 1)
STANDBY/OFF	STANDBY/OFF	STANDBY/OFF

1. WORK: In diesem Zustand arbeitet das betrachtete Subsystem unter Volllast
2. WORK (Teillast 1): Dieser Zustand beschreibt einen optionalen Teillastbereich des jeweiligen Subsystems
3. STANDBY/OFF: In diesem Zustand ist das System vollständig abgeschaltet oder im Standby-Modus

5.2.4 Zusammenführung der Partialsysteme zu einem Gesamtmodell

Die peripheren Systeme haben einen wesentlichen Einfluss auf das energetische Verhalten der Produktion. Da ein lokales energetisches Optimum einer Ressource nicht zwangsläufig ein energetisches Optimum der gesamten Produktion zur Folge hat, ist es erforderlich, die Ressourcen der Hauptprozesse und die peripheren Systeme danach zu koordinieren, dass der gesamte Energieverbrauch im Bilanzraum minimal wird (globales Minimum).

Um alle Partialsysteme zu einem Gesamtsystem zusammenführen zu können, ist eine Kenntnis der Zusammenhänge und Wechselwirkungen erforderlich. Um diese zu erfassen, werden Informations-,

Stoff- und Energieströme modelliert. Auf Basis dieser Informationen werden die Partialmodelle miteinander in Bezug gesetzt. Die Modelle der einzelnen Ressourcen bilden die erste Detaillierungsstufe. Die zweite Detaillierungsstufe umfasst den gesamten Bilanzraum einer Produktion.

Die Kommunikation der peripheren Systeme mit den Ressourcen der Hauptprozesse erfolgt indirekt durch ein übergeordnetes Managementsystem oder auf direktem Weg. Zusätzlich gilt zu beachten, dass die peripheren Systeme untereinander in geeigneter Weise verknüpft werden. Dadurch können geeignete Steuergrößen identifiziert werden, die für die spätere Energieoptimierung (vgl. Kapitel 5.7) eine wesentliche Rolle spielen.

Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen peripheren Systeme erster, zweiter und dritter Ordnung geben beispielhaft einen Überblick über die unterschiedlichen Zusammenhänge und relevanten Einflussgrößen. Das Ergebnis der Modellierung des Gesamtsystems ist das Erlangen eines Verständnisses für die Wirkzusammenhänge und gegenseitigen Abhängigkeiten.

Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8 stellen ein exemplarisches Gesamtmodell dar, das die im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigten Aspekte beinhaltet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde neben den peripheren Systemen nur ein Bearbeitungszentrum dargestellt. Die erste Abbildung stellt die Energie- und Stoffströme sowie die Zusammenhänge der Subsysteme untereinander dar. Es wird deutlich, dass schon im vereinfachten Modell eine Vielzahl von Energie- und Stoffströmen vorhanden sind, über die die Subsysteme miteinander in Wechselwirkung stehen. Abbildung 5-8 beinhaltet die Informationsströme. Aus dieser Abbildung geht hervor, dass die informationstechnische Verknüpfung der Subsysteme untereinander häufig nicht explizit vorhanden ist. Auch die „statusbasierte Ansteuerung“ z.B. zwischen Managementsystem und KSS- oder Druckluftsystem ist häufig nicht vorhanden. Das hat zur Folge, dass meistens auch keine Möglichkeit besteht, auf die Systeme Einfluss zu nehmen und sie in einen energieoptimalen Status zu versetzen.

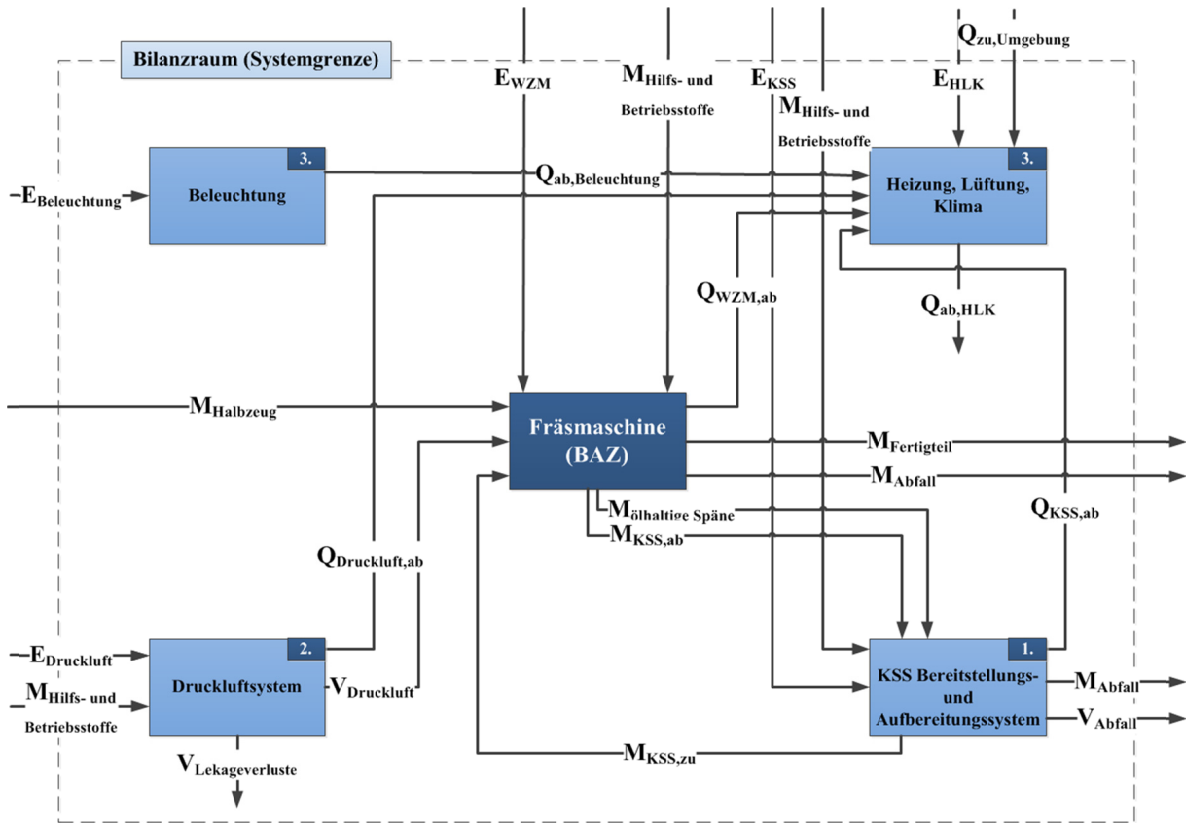


Abbildung 5-7: Exemplarisches Gesamtmodell einer Produktion (Energie- und Stoffströme)

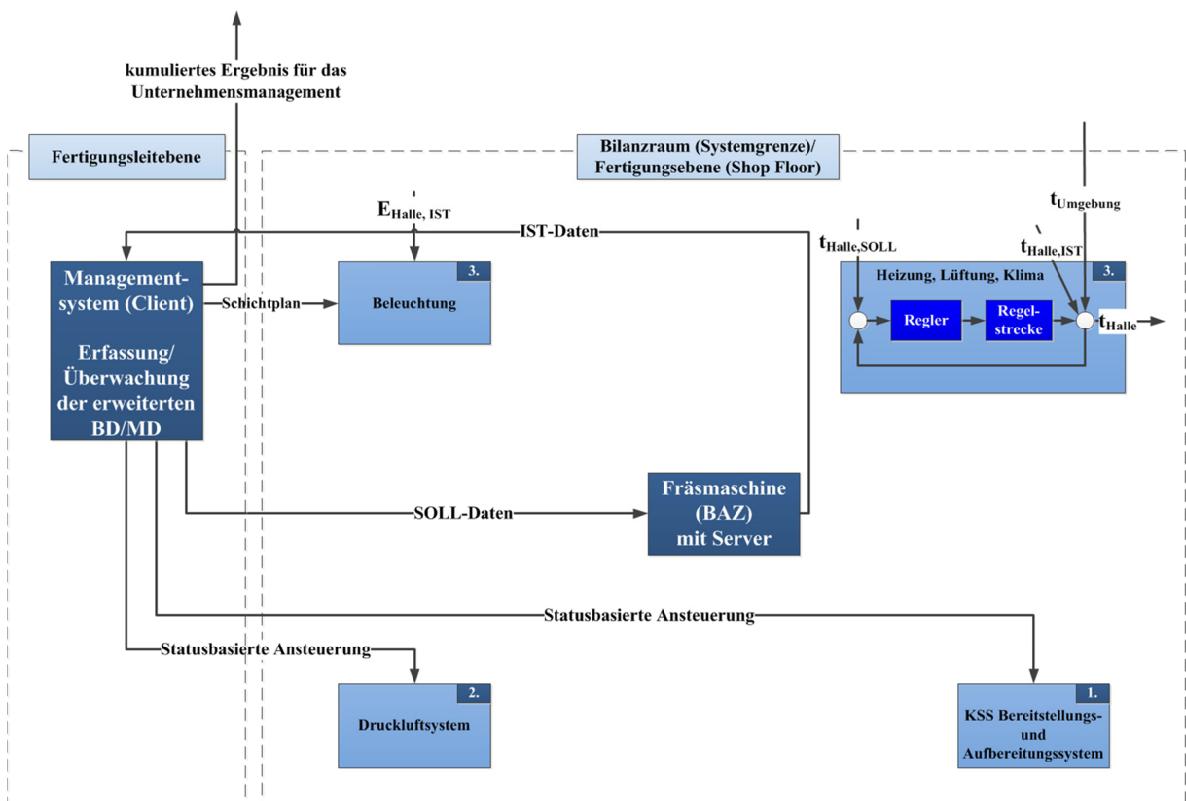


Abbildung 5-8: Exemplarisches Gesamtmodell einer Produktion (Informationsströme)

5.2.5 Anbindung einer Felddatenerfassung und Datenakquise

Die Bereitstellung und Nutzung von Felddaten stellt einen wichtigen Aspekt der erarbeiteten Methodik dar. Da die Status der einzelnen Ressourcen auf Basis von Felddaten ermittelt werden können, ist eine Verknüpfung mit einer Methodik, die die Daten in geeigneter Weise zur Verfügung stellt, erforderlich. Methodisch wird hierfür auf die in der Forschergruppe „ECOMATION“ entwickelte „Factory Energy Information Description Language“ (F-EIDL) zurückgegriffen, die auf der „Energy Information Description Language“ (EIDL) basiert (vgl. Kapitel 3). Diese Methodik stellt allen beteiligten Systemen die erforderlichen Daten aus heterogenen Datenquellen zur Verfügung. Da es für den Datenkonsumenten nicht relevant ist, wie diese Daten generiert werden und woher sie kommen bzw. von wem sie zur Verfügung gestellt werden, können auch unterschiedliche Datenausprägungen wie z.B. Schätzwerte, Messwerte („live values“), berechnete Werte oder Simulationsergebnisse aus detaillierten Prozessmodellen und Simulationen auf einfache Art und Weise verwendet und kombiniert werden. Da F-EIDL einen auf XSD-basierten, modularen und skalierbaren Ansatz darstellt, ist eine Anpassung auf das zu betrachtende System vorzunehmen. Um heterogene Datenquellen erfassen und in F-EIDL einbinden zu können, ist nach folgendem Ablauf vorzugehen:

1. Festlegung des Bilanzraums
2. Identifikation von jedem zu berücksichtigenden Energieverbraucher
3. Analyse der vorhandenen Daten
4. Anpassen und Befüllen der F-EIDL Baumstruktur

Die Festlegung des Bilanzraums bildet die Grundlage für die erforderliche Identifikation der möglichen Energieverbraucher. Je nach Art und Häufigkeit der identifizierten Verbraucher sowie der gewünschten Genauigkeit kann es zielführend sein, nur die Hauptverbraucher zu berücksichtigen. Hierbei kann auf eine Pareto-Analyse oder Sensitivitätsanalyse zurückgegriffen werden. Die Analyse der vorhandenen Daten ist von zentraler Bedeutung. F-EIDL stellt die Möglichkeit zur Verfügung, sowohl gemessene Felddaten, als auch geschätzte, konstante Werte oder Modelle zu berücksichtigen. Modelle können insbesondere dann zum Einsatz kommen, wenn keine expliziten energetischen Daten bekannt sind. Werte wie z.B. der Volumenstrom des KSS-Systems oder der erforderliche Förderdruck können über Detailmodelle auf die benötigte elektrische Leistung zurückgerechnet werden. Alternativ können Formeln wie z.B. Formel 2-5 verwendet werden (vgl. Kapitel 2).

Abbildung 5-9 stellt die baumartige F-EIDL Struktur dar (oben), die an den Bilanzraum angepasst werden kann. Jedes Element beinhaltet die Reiter „attributes“ und „energy information“ (Feld „A“ in Abbildung 5-9).

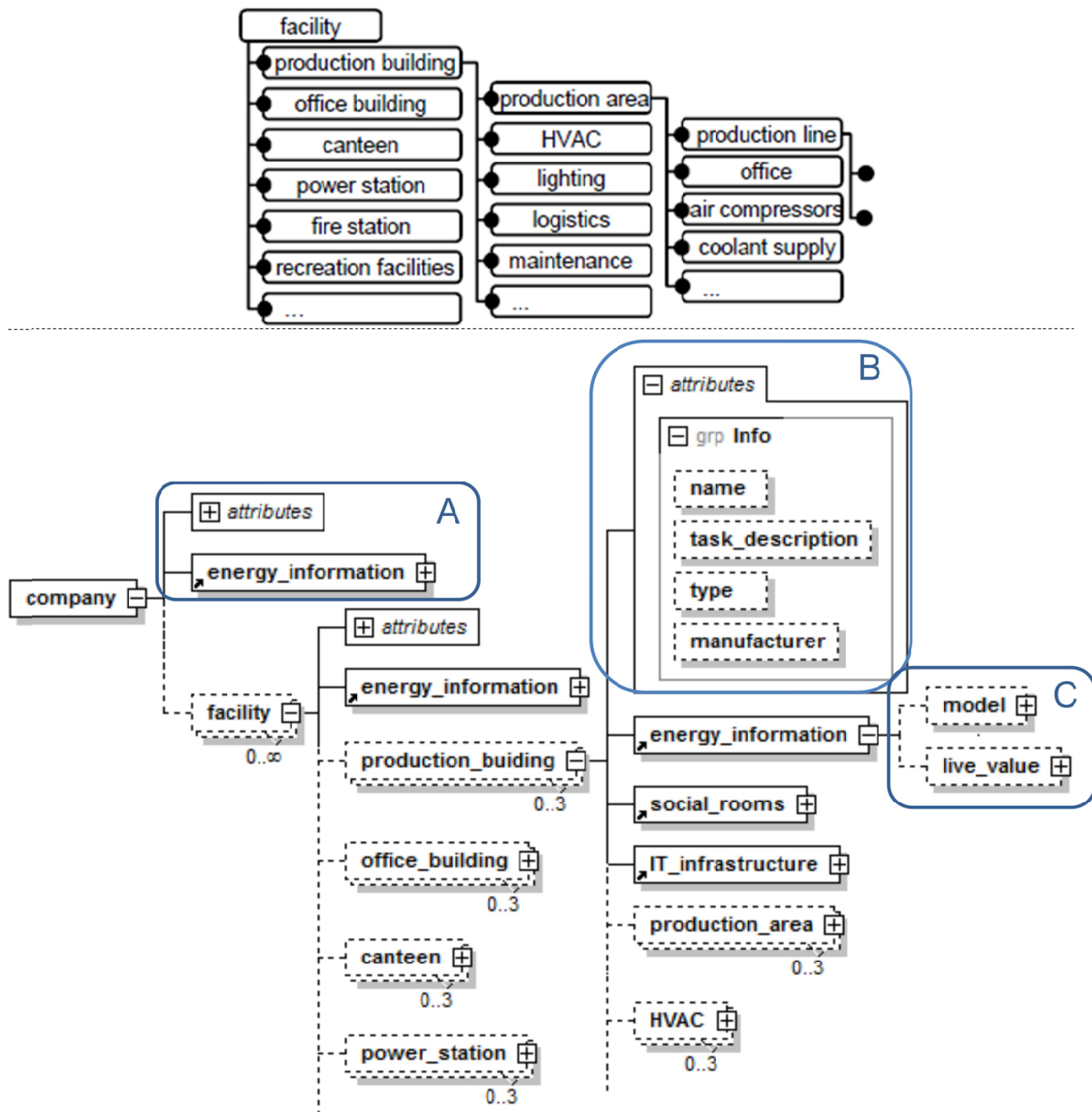


Abbildung 5-9: F-EIDL (Auszug) (nach [Eberspächer et al. 2012])

Unter „attributes“ können allgemeine und technische Daten über den Verbraucher hinterlegt werden, wie z.B. Name, Funktion, Typ oder Hersteller der Ressource (Feld „B“ in Abbildung 5-9). Über den Knoten „energy information“ kann entweder die Verwendung von Modellen sowie deren Verknüpfung miteinander beschreiben werden („model“) oder es können Informationen über die verwendeten Kommunikationsarchitekturen und die konkreten Bereitstellungsorte von Felddaten hinterlegt werden (Feld „C“ in Abbildung 5-9).

Bei der Datenerfassung von energetischen Felddaten und Betriebsdaten sind die in Kapitel 2 vorgestellten Möglichkeiten zur Datenerfassung zu berücksichtigen, die in Abhängigkeit von Randbedin-

gungen, verfügbarer Kapazität (personell und finanziell) und Zielsetzungen auf ihre Eignung hin zu überprüfen sind. Eine Echtzeitdatenerfassung und –Verarbeitung von Verbrauchswerten direkt aus der Steuerung ist z.B. über eine OPC-Schnittstelle möglich.

5.3 Roll-out des Gesamtmodells

Die vorhergehenden Teilschritte führen zu einem Gesamtmodell, welches die Grundlage für die energetische Planung, Bewertung und Optimierung bildet. Hierbei steht die Verbindung zur Arbeitsplanung und –Steuerung im Mittelpunkt, um sowohl zeitlich als auch Ebenen übergreifend die Stellhebel in Bezug auf die Energieoptimierung einer Produktion zu integrieren.

Um das vorgestellte Gesamtmodell zu erarbeiten, werden zusammenfassend folgende Informationen benötigt:

Benötigte Inputs und Outputs:

- Informationsfluss in der Produktion (im Bilanzraum)
- Energie- und Stofffluss in der Produktion (im Bilanzraum)
- Art und Menge der betrachteten Ressourcen (Ressourcen der Hauptprozesse und Peripherie)
- Mögliche Status der Ressourcen
- Leistungsaufnahme der betrachteten Ressourcen je Status
- Zeitanteile, in denen die Status anliegen

Folgende Methoden und Datenquellen unterstützen bei der Informationsbeschaffung:

Anwendbare Methoden und erforderliche Datenquellen:

- Energiewertstrommethode
- Input/Output-Analyse
- Auswertung der Betriebsdatenerfassung
- Gemessene und/oder geschätzte Verbrauchswerte
- Optional: verfügbare, detaillierte Simulationsmodelle der Ressourcen
- Optional: Pareto- oder Sensitivitätsanalyse zur Identifikation der Hauptverbraucher

5.4 Erweiterung der Arbeitsvorbereitung

Die im vorherigen Kapitel erarbeiteten Modelle berücksichtigen keine variablen Parameter, die aus der Arbeitsplanung vorgegeben werden können. Um diese Funktionalität zu integrieren, sind geeignete Schnittstellen zwischen der Arbeitsplanung und den Modellen zu identifizieren und umzuset-

zen. Außerdem ist eine Verknüpfung mit der Arbeitssteuerung vorzunehmen. Eine Erfassung der Betriebsdaten sowie eine Methodik zur Kommunikation zwischen dem übergelagerten Managementsystem und den Ressourcen erlauben die energetische Bewertung verschiedener Ereignisse in der Produktion sowie die Ableitung von geeigneten Maßnahmen.

Es werden folglich ein „Planungskreis“ für die Integration der Arbeitsplanung und ein „Steuerungskreis“ für die Integration des Auftragsmanagements erarbeitet (vgl. Abbildung 5-10).

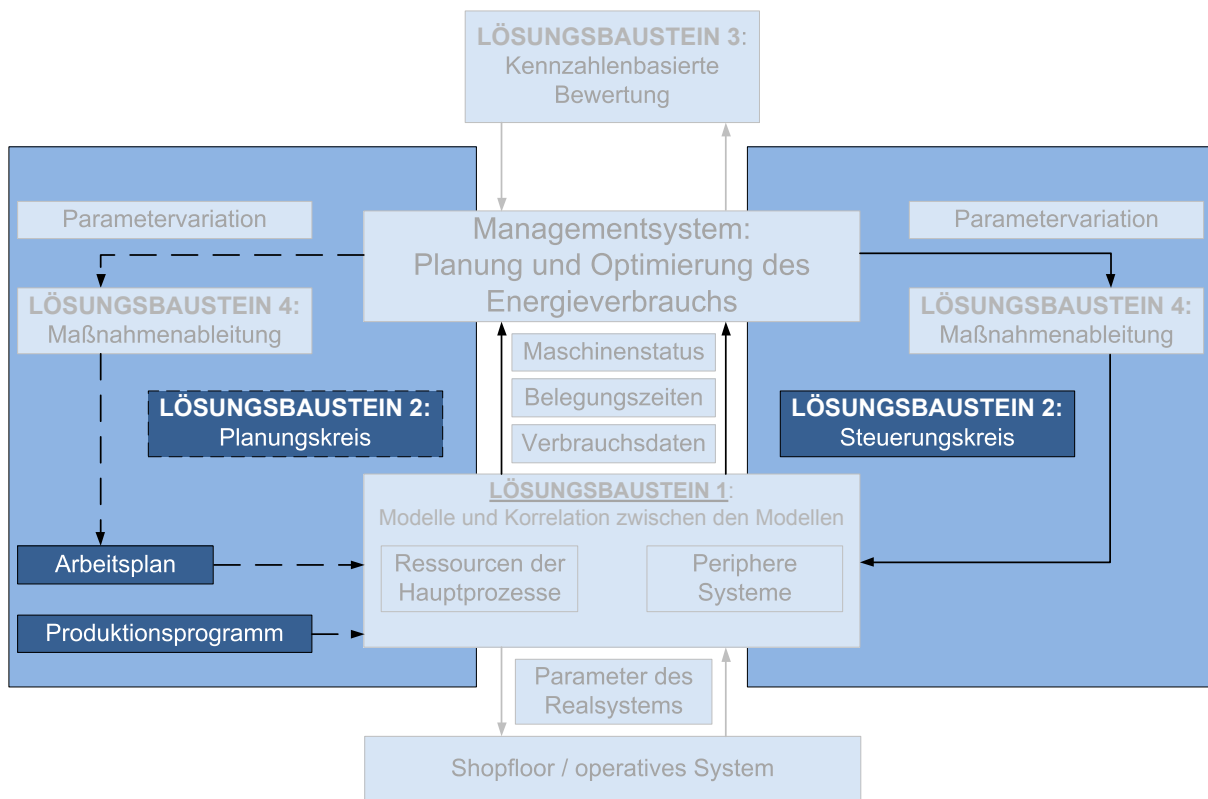


Abbildung 5-10: Lösungsbaustein „Erweiterung und Integration der Arbeitsverbereitung“ im Kontext der Methodik

5.4.1 Verknüpfung mit der Arbeitsplanung

In der Arbeitsplanung wird eine Vielzahl von Parametern vorgegeben, die einen Einfluss auf den späteren Energiebedarf der Produktion haben. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf den Tätigkeiten der Arbeitsplanerstellung und der darauf folgenden Operationsplanung. Folglich werden die Hauptschritte der Arbeitsplanerstellung und der Operationsplanung auf Einflussparameter bezüglich des Energieverbrauchs der Produktion hin untersucht. Es werden die relevanten Parameter identifiziert und durch eine geeignete Schnittstelle mit den Modellen verknüpft. In einem weiteren Schritt wird die Methodik dahingehend erweitert, dass ein geschlossener Planungskreis entsteht, der

die Grundlage für die spätere Optimierung bildet, in der ein energieoptimaler Parametervektor für den Arbeitsplan und die Operationsplanung ermittelt werden kann (vgl. Abbildung 5-10 und Abbildung 5-1).

Um eine Schnittstelle zwischen Arbeitsplanung und den Modellen entwickeln zu können, wird die Zusammensetzung der Energiebedarfe der betrachteten Ressourcen analysiert. Die identifizierten Einflussgrößen können darauf aufbauend den einzelnen Phasen der Arbeitsplanerstellung und der Operationsplanung zugeordnet werden. Somit wird es möglich, die Auswirkungen der Änderungen während dieser Planungsschritte direkt auf den späteren Energiebedarf zu beziehen.

Die Hauptschritte der Arbeitsplanerstellung bestehen aus Rohmaterialbestimmung, Arbeitsvorgangsfolgenermittlung, Fertigungsmittelzuordnung und Vorgabezeitermittlung. Die Operationsplanung lässt sich in die Teilschritte Spannlagenbestimmung, Operationsbestimmung, Werkzeugbestimmung, Schnittstrategiebestimmung und abschließende Optimierung einteilen (vgl. Kapitel 2).

In diesen Teilschritten werden wesentliche Einflussgrößen auf den späteren Energieverbrauch der Produktion festgelegt.

Die Untersuchung zur Ermittlung von Schnittstellen zwischen Modellen und der Arbeitsplanung erfolgt in drei Schritten durch Unterscheidung folgender Teilenergieverbräuche:

- Prozessenergieverbrauch (W_{Prozess})

Der Prozessenergieverbrauch beschreibt den Energieanteil, der sich aus der Differenz zwischen Luftschnitt und Materialabtrag ergibt. Unter dem Luftschnitt wird in diesem Zusammenhang das Abfahren des gesamten NC-Programms ohne Werkzeugeingriff verstanden.

- Energieverbrauch der Ressourcen der Hauptprozessen ($W_{\text{Ressource}}$)

Der Energieverbrauch der Ressourcen setzt sich aus einer mittleren Grundleistung und einer mittleren Leerlaufleistung zusammen (vgl. Formel 3-2). Bei der Leerlaufleistung handelt es sich um die mittlere Leistungsaufnahme, die während des oben genannten Luftschnittes anfällt. Die Grundleistung beschreibt die Leistung, die von der betriebsbereiten Ressource zur Erhaltung der Betriebsbereitschaft benötigt wird.

- Energieverbrauch der peripheren Systeme ($W_{\text{Peripherie}}$)

Dieser Anteil des Energieverbrauchs subsummiert die Verbräuche sämtlicher betrachteter peripheren Systeme der ersten, zweiten und dritten Ordnung.

Diese Teilenergieverbräuche werden bezüglich ihrer Verknüpfungen mit der Arbeitsplanung untersucht. Hierfür wird in einem ersten Schritt ermittelt, aus welchen Einflussgrößen sich der jeweilige

Energieverbrauch zusammensetzt. In einem zweiten Schritt wird untersucht, in welcher Phase der Arbeitsplanung die einzelnen Einflussgrößen festgelegt werden.

Abbildung 5-11 verdeutlicht exemplarisch die Zusammenhänge zwischen W_{Prozess} und $W_{\text{Ressource}}$.

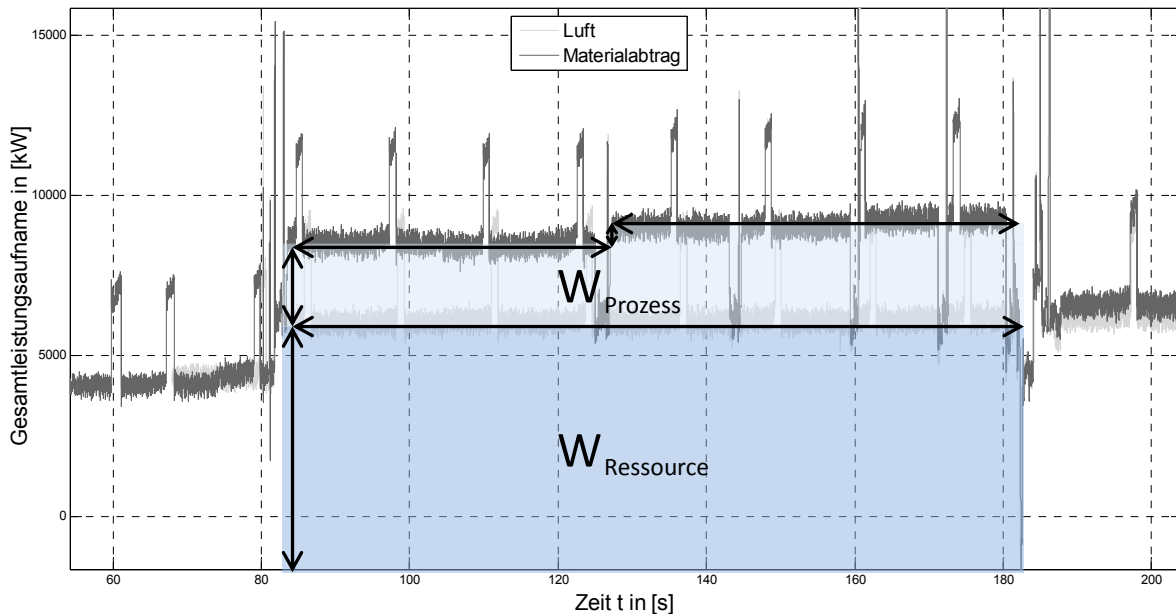


Abbildung 5-11: Prozessenergieverbrauch und Ressourcenenergieverbrauch

Prozessenergieverbrauch W_{Prozess}

Der Energiebedarf an der Spanantstehungsstelle W_{Prozess} kann nach *Schiefer* durch Formel 3-1 (in Anlehnung an *Victor und Kienzle*) berechnet werden (vgl. Kapitel 3 und Abbildung 5-12). Diese Formel beinhaltet sämtliche Einflussgrößen auf den Prozessenergieverbrauch und ist durch die Korrekturfaktoren für sämtliche Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide geeignet. Für jeden Arbeitsgang im Prozessablauf sind die Einflussgrößen spezifisch festzulegen und W_{Prozess} zu berechnen. Hierfür existiert eine Vielzahl von Zerspanungshandbüchern, aus welchen die prozessspezifischen Korrekturfaktoren entnommen werden können.

Die einzelnen Komponenten der Formeln (die den Einflussgrößen auf den Energieverbrauch entsprechen) können den einzelnen Phasen der Arbeitsplanung (Arbeitsplanerstellung und Operationsplanung) zugeordnet und auf ihre Beeinflussbarkeit hin untersucht werden. Die folgende Abbildung 5-12 stellt diese Zusammenhänge dar. Es wird deutlich, dass sowohl durch die Operationsplanung als auch durch die Arbeitsplanerstellung eine Vielzahl von Parametern direkt festgelegt wird. Nur wenige Parameter werden nicht bestimmt:

- Der Energieverbrauch der dritten peripheren Ebene wird vom Facility Management beeinflusst.

- Der Hauptwert der spezifischen Schnittkraft $k_{c1.1}$ wird durch die Materialauswahl in der Konstruktion festgelegt und über die technische Zeichnung an die Arbeitsplanung als feste Größe übergeben.

Die Parameter des Prozessenergieverbrauchs werden nahezu vollständig in der Operationsplanung festgelegt. Eine Ausnahme stellt der Korrekturfaktor für das Verfahren dar, welcher durch die Verfahrensauswahl im Rahmen der Arbeitsplanerstellung bestimmt wird.

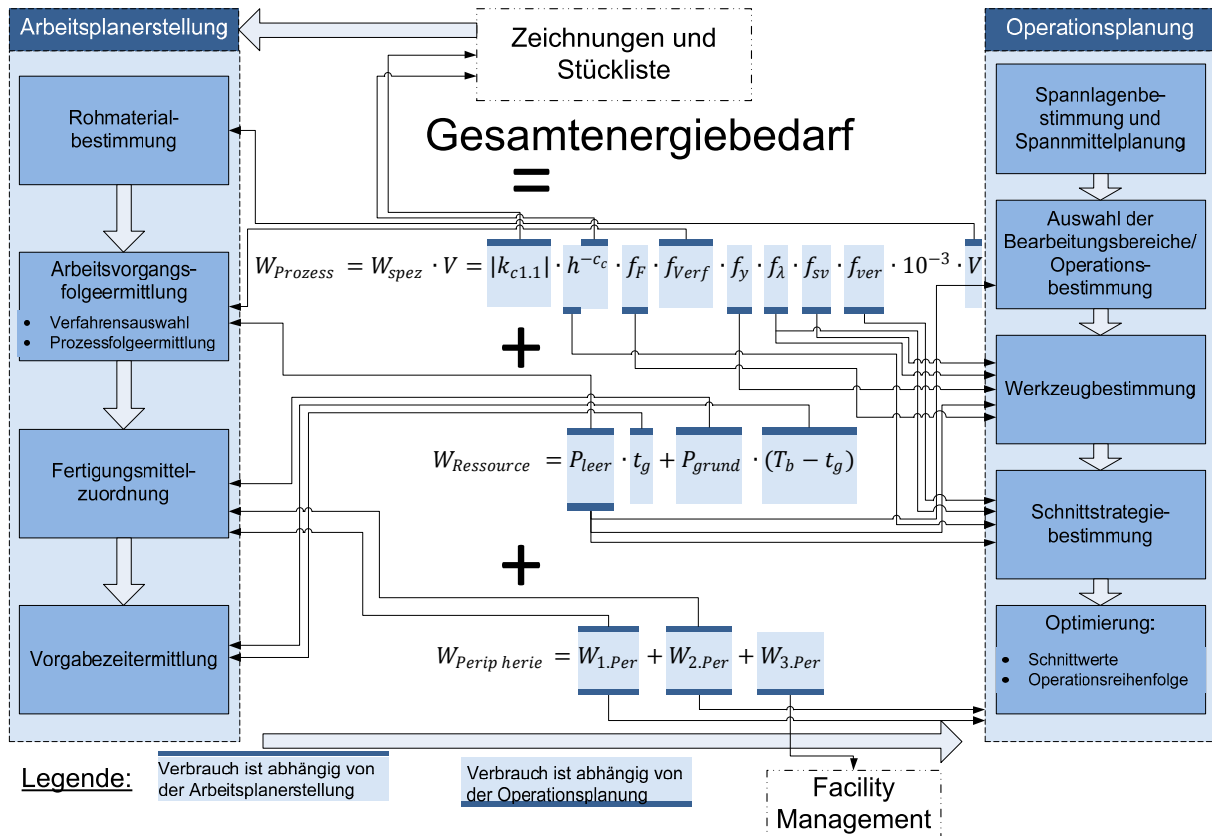


Abbildung 5-12: Analyse der Einflussgrößen auf den Energieverbrauch in der Arbeitsplanung

Die energetische Komponente W_{Prozess} fällt nur an, wenn die Ressource arbeitet, sich also im Zustand „WORK“ befindet (vgl. Kapitel 5.2)

Energieverbrauch der Ressourcen der Hauptprozesse $W_{\text{Ressource}}$

Bei der zweiten Komponente des Gesamtenergieverbrauchs handelt es sich um den Energieverbrauch der Ressourcen $W_{\text{Ressource}}$ (vgl. Abbildung 5-12). Dieser ist von den Status der Ressourcen, den Belegungszeiten und der Leerlaufleistung abhängig und kann auch unabhängig vom Energieverbrauch der Prozesse beeinflusst werden. Die wesentlichen Einflussfaktoren in der Arbeitsplanerstellung stellen die Fertigungsmittelauswahl sowie die Vorgabezeitermittlung dar. Aber auch die Schnittstrategiebestimmung in der Operationsplanung hat einen Einfluss auf die Leerlaufleistung

beim Luftschnitt und dadurch auf $W_{\text{Ressource}}$. Als Beispiel für solche Einflussfaktoren können z.B. gewählte Achsbeschleunigungen oder die Anzahl der Lastwechsel genannt werden.

Der Anteil P_{grund} ist vollständig von der gewählten Ressource abhängig (vgl. Abbildung 5-12) und wird in allen verfügbaren Zuständen der Ressource (mit Ausnahme von STANDBY/OFF) benötigt, der Anteil P_{leer} (= Leistungsaufnahme des Luftschnitts) beinhaltet P_{grund} und fällt nur im Zustand WORK an. Die Ermittlung dieses Faktors kann entweder durch eine Messung, durch eine Mittelwertbildung oder durch einen Zuschlagsatz auf den Prozessenergieverbrauch ermittelt werden.

Energieverbrauch der peripheren Systeme $W_{\text{Peripherie}}$

Der Energieverbrauch der peripheren Systeme $W_{\text{Peripherie}}$ wird während der Arbeitsplanerstellung und Operationsplanung nicht direkt festgelegt, da keine explizite Auswahl der peripheren Systeme stattfindet. Jedoch ist eine indirekte Festlegung des Verbrauchs der Peripherie Bestandteil der Planungsschritte, da die Auswahl einer Ressource der Hauptprozesse Anforderungen an die Infrastruktur der ersten und zweiten Peripherie (wie z.B. erforderliche Druckluftmenge oder KSS-Volumenstrom und -temperatur) stellt. Systeme der dritten Peripherie werden im Normalfall vom Facility Management festgelegt und können somit durch die Arbeitsplanerstellung und Operationsplanung nicht beeinflusst werden.

Fazit:

Durch die Aufteilung des Gesamtenergieverbrauchs in die Komponenten „Prozess“, „Ressource“ und „Peripherie“ sowie die Analyse der Einflussfaktoren, können alle relevanten Einflussgrößen der Arbeitsplanerstellung sowie der Operationsplanung auf den Energieverbrauch der Produktion strukturiert ermittelt werden (vgl. Abbildung 5-12). Es ergibt sich gemäß Formel 5-2 der Gesamtenergieverbrauch W_{gesamt} :

$$W_{\text{gesamt}} = W_{\text{Hauptprozess}} + W_{\text{Peripherie}} = W_{\text{Prozess}} + W_{\text{Ressource}} + W_{\text{Peripherie}} \quad \text{Formel 5-2}$$

Durch die Verknüpfung der Arbeitsplanung mit Modellen können z.B. zwei alternative Arbeitspläne oder eine Variation einzelner Parameter bezüglich ihres Einflusses auf das energetische Verhalten der Produktion hin untersucht werden. Das führt zu einer Methodik zur Planung des energetischen Verhaltens in der Produktion unter Berücksichtigung der Arbeitsplanung und der Peripherie. Diese bildet die Grundlage für die spätere Optimierung, da relevante Stellgrößen identifiziert und variiert werden können.

5.4.2 Erweiterung der Arbeitssteuerung

Die Arbeitssteuerung umfasst nach *Eversheim* alle Tätigkeiten, die für den Ablauf der Fertigung im Rahmen der Auftragsdurchsetzung erforderlich sind. Hierbei ist eine Kommunikation zwischen den beteiligten Systemen erforderlich (vgl. Kapitel 2). Im Rahmen dieser Arbeit ist insbesondere ein Datenaustausch zwischen den Ressourcen der Hauptprozesse und der Peripherie mit der übergelagerten Managementebene erforderlich. Einzelne Ressourcen haben im Allgemeinen keine Kenntnis über den Zustand der anderen beteiligten Ressourcen. Die Aufgabe der Koordination übernimmt ein Managementsystem.

Eine geeignete Methode zur Kommunikation bildet hierbei die Grundlage für die Erfassung der benötigten Informationen sowie die Möglichkeit, Aktionen bei den beteiligten Ressourcen auszuüben.

Als Anforderung ergibt sich somit eine Möglichkeit zur bidirektionalen Kommunikation zwischen Managementsystem und den Ressourcen, welche nicht nur den konventionellen Austausch von Betriebsdaten gewährleistet. Es ist zusätzlich ein Austausch von energetischen Felddaten erforderlich. Zudem besteht die Möglichkeit, die Ressourcen in den gewünschten Status zu versetzen.

Da eine konventionelle Betriebsdatenerfassung heute (zumindest in der Linienfertigung) Stand der Technik ist (vgl. Kapitel 2), wird keine zusätzliche neue Funktionalität der Datenerfassung erarbeitet, sondern eine Möglichkeit, geschaffen, eine eventuell bestehende BDE zu erweitern.

Um den Austausch von Energiedaten sowie die Möglichkeit der Einflussnahme auf die Ressourcen zu ermöglichen, wird eine Methode aufgebaut, welche die Grundlage für die energieoptimale Regelung der Ressourcen bereitstellt. Zwei wesentliche Aufgaben sind zu erfüllen:

- Die zeitdiskrete, quasi-kontinuierliche Erfassung von Energiedaten der Ressourcen (Monitoring)
- Die ereignisdiskrete Kommunikation zwischen Ressourcen und Managementsystem (Messaging)

Die Erfüllung dieser Anforderungen erfolgt durch ein bidirektionales Messaging-System, welches in die Teilfunktionalitäten Monitoring und Messaging aufgeteilt ist (vgl. Abbildung 5-13).

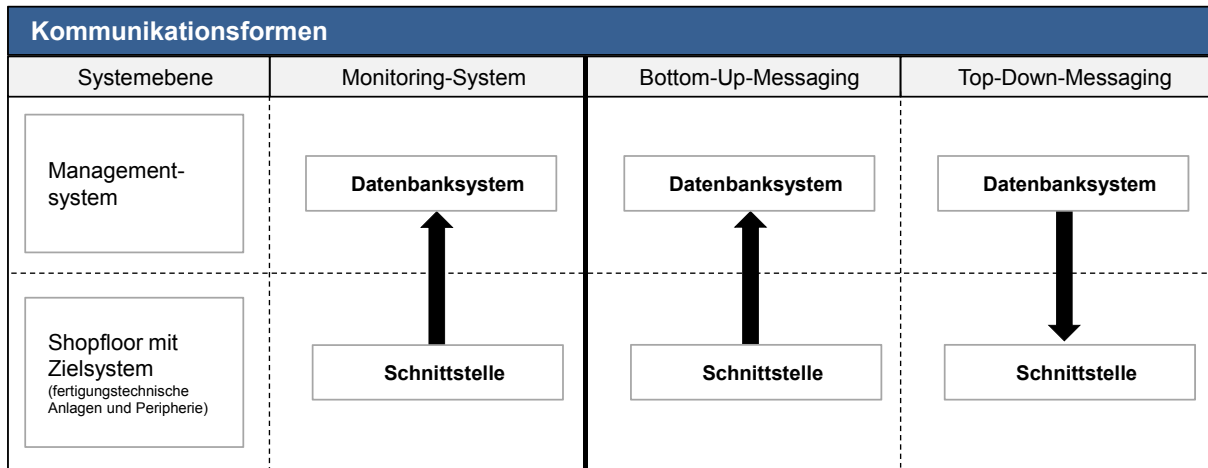


Abbildung 5-13: Funktionalitäten der Kommunikationsarchitektur

Im folgenden Abschnitt werden die Teilfunktionalitäten näher beschrieben:

Zeitdiskrete Datenerfassung durch die Monitoring-Funktionalität

Die zeitdiskrete Datenerfassung zeichnet die ressourcenspezifischen Energieverbräuche auf und legt sie in einer geeigneten Datenbank ab, welche mit dem Managementsystem verknüpft ist. Hierbei ist es von großer Bedeutung, dass für die Messwerte ein einheitlicher Zeitstempel und eine eindeutige Ressourcen-ID vergeben werden. Außerdem ist die Herstellung eines Auftragsbezugs (z.B. durch eine Teile-ID) erforderlich. Nur so ist eine spätere Zuordnung der energetischen Verbrauchsdaten mit dem entsprechenden Zustand der Ressource und der gefertigten Werkstück möglich (vgl. Kapitel 5.3). Die direkte Erfassung des Betriebszustands der Ressource ist nur erforderlich, wenn diese Information nicht von einer bereits bestehenden BDE zur Verfügung gestellt wird. Die Wahl des Zeitintervalls der Aufzeichnung von Energiedaten muss ressourcenspezifisch gewählt werden und ist abhängig vom Zustandswechsel:

Bei häufigem Zustandswechsel ist ein geringeres Zeitintervall der Datenerfassung zu wählen. Hierbei ist insbesondere darauf zu achten, dass zeitlich nur sehr kurz anliegende Zustände berücksichtigt werden, auch wenn das Integral dieser Energiespitzen aufgrund der kurzen Zeitspanne häufig keinen großen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch im Betrachtungszeitraum hat. Die Wahl dieser Parameter kann durch die Auswertung bereits vorhandener Betriebsdaten oder durch Expertenwissen getroffen werden.

Der Nutzen des Monitoring-Systems ist vielfältig:

Es können energetische Felddaten gesammelt und ausgewertet werden. Dabei ist es z.B. möglich, Lastganglinien aufzuzeichnen und zu charakterisieren. Außerdem wird es ermöglicht, über verschiedene Abfragen Informationen zum jeweils anliegenden Betriebszustand der Ressource zu er-

langen oder statistische Auswertungen durchzuführen. Somit erhält der Anwender ein Gefühl für die zu analysierende Anlage. Ein weiterer großer Nutzen liegt in der Vorgabe von Verbrauchskorridoren für die jeweilige Ressource. Dies ermöglicht eine Aufspannung eines Toleranzkanals, welcher durch die durchgängige Felddatenerfassung von energetischen Informationen permanent aktuell gehalten wird. Eine Überschreitung der Grenzen führt zum Auslösen eines Ereignisses. Somit kann die Funktionalität des energieinduzierten Condition-Monitorings durch die Monitoring-Funktionalität umgesetzt werden.

Abbildung 5-14 stellt die benötigten Informationen für das Monitoring-System sowie den exemplarischen Aufbau eines Datenpaketes dar: Neben dem bereits erwähnten Zeitstempel, der Stations-ID, der Teile-ID und dem anliegenden Status der Ressource werden Messwerte des Energieverbrauchs benötigt.

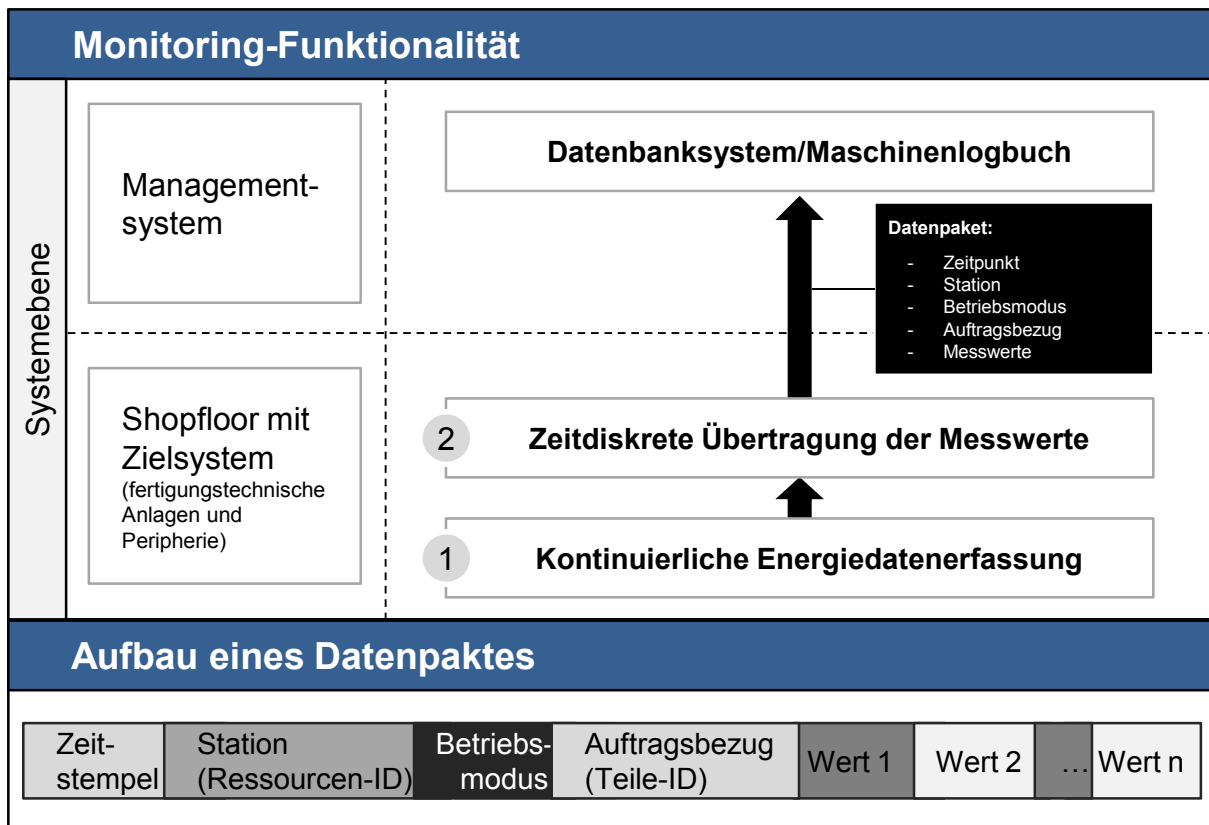


Abbildung 5-14: Monitoring: Benötigte Informationen und Aufbau eines Datenpaketes

Ereignisdiskrete Kommunikation über das Messaging-System

Die ereignisdiskrete, bidirektionale Kommunikation zwischen Ressourcen und Managementsystem stellt einen wesentlichen Bestandteil der gewählten Methodik zur Erweiterung der Arbeitssteuerung dar. Hierbei handelt es sich wie bereits erwähnt nicht um die klassische Betriebsdatenerfassung

(vgl. Kapitel 2) oder um die reine Ermittlung von Energiedaten, sondern um die Generierung von spezifischen Informationspaketen, die sowohl vom übergelagerten Managementsystem als auch von den beteiligten Ressourcen interpretiert werden können. Die Messaging-Funktionalität basiert auf der Monitoring-Funktionalität. Es wird zwischen Nachrichten unterschieden, die von unten nach oben gesendet werden (Bottom-up Nachrichten) und solchen, die von oben nach unten gesendet werden (Top-down Nachrichten) (vgl. Abbildung 5-13).

Der Inhalt der Nachrichten ist der Abbildung 5-15 zu entnehmen. Neben dem bereits beschriebenen Zeitstempel, dem Auftragsbezug und der Stations-ID werden ein Nachrichtentext und eine Zeitspanne übertragen. Energiewerte werden nicht übermittelt, da diese von der Monitoring-Funktionalität bereitgestellt werden.

Der Nachrichtentext dient in erster Linie als Entscheidungshilfe für den verantwortlichen Maschinenbediener oder Instandhalter. Die Zeitspanne ist von äußerster Wichtigkeit, da diese die Basis bildet, um die gesamte Produktion durch die Optimierungsmethodik situationsspezifisch zu parametrieren und dadurch am energetisch geeigneten Betriebspunkt zu betreiben.

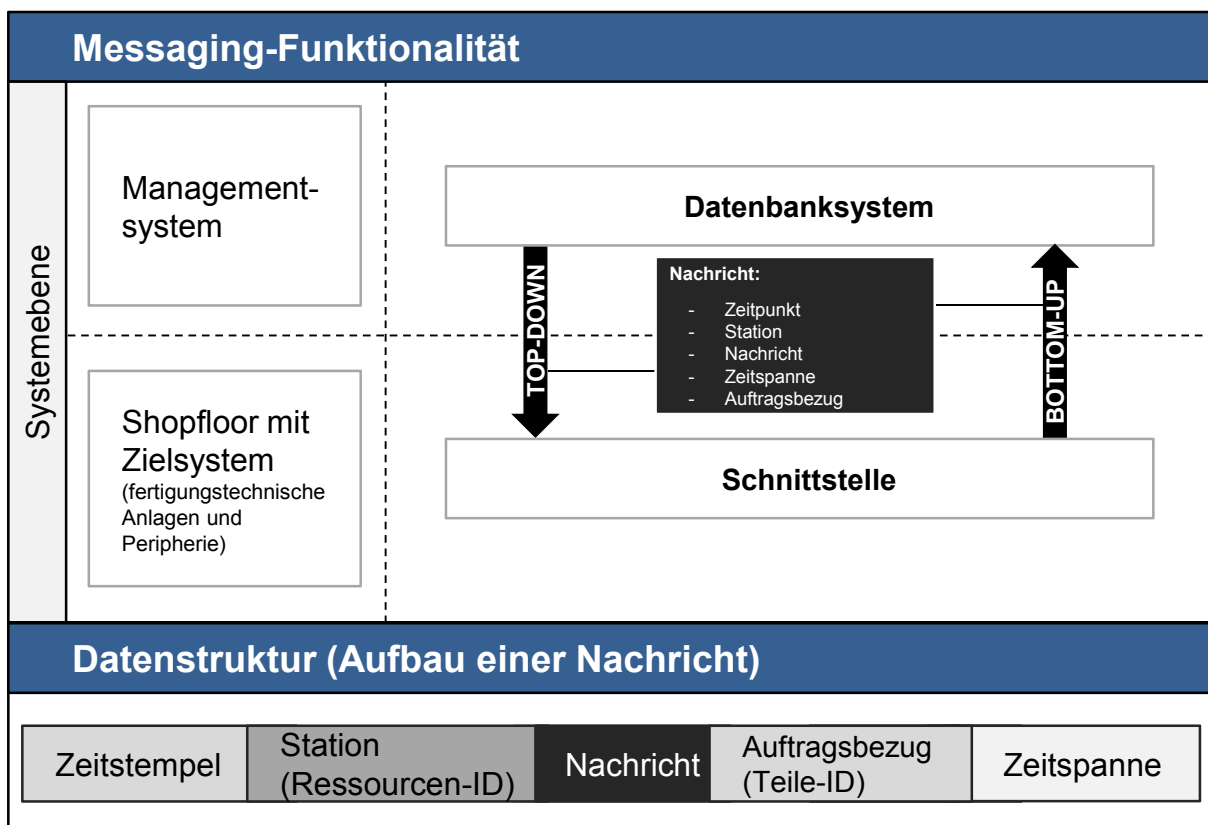


Abbildung 5-15: Messaging: Benötigte Informationen und Aufbau eines Datenpaketes

Die Architektur des Nachrichtensystems ist an ein Mail-Prinzip angelehnt: Hierbei verfügt jeder Teilnehmer (sowohl Ressourcen als auch Managementsystem) über einen Posteingang und einen Postausgang. Nachrichten werden vom Postausgang eines Teilnehmers direkt in den Posteingang des anderen Teilnehmers übertragen. Die im Posteingang angekommenen Nachrichten werden daraufhin in geeigneter Weise interpretiert. Um eine korrekte Interpretation zu gewährleisten, müssen die Nachrichten über einen einheitlichen Standard verfügen. Des Weiteren müssen alle beteiligten Kommunikanten in der Lage sein, die Nachrichten (insbesondere die Nachrichten ID und ggf. die Zeitspanne) über eine Zuordnungstabelle zu entschlüsseln. Tabelle 5-6 stellt eine exemplarische Vorauswahl an Nachrichten dar. Eine unternehmensspezifische Anpassung ist erforderlich.

Tabelle 5-6: exemplarische Nachrichtentypen des Messaging-Systems

Nachricht	ID	Kurzbeschreibung	Zeitspanne	Nachrichtentyp
Schichtbeginn	20	Beginn Schicht	keine	Top-down
Schichtende	25	Ende Schicht	keine	Top-down
Pause-Mini	30	Kurze Unterbrechung - max. 5 Minuten	variabel (1 – 5 min.)	Bottom-up
Pause-Kurz	40	Kurze Pause - 15 Minuten	15 min.	Top-down oder Bottom-up
Pause-Lang	50	Lange Pause - 30 Minuten	30 min.	Top-down oder Bottom-up
Schichtwechsel	60	Wechselzeitraum - Schicht 1 zu 2	Fest vorgegeben (z.B. 15 min.)	Top-down
Unfall	70	Unfall mit/ohne Personenschaden	variabel	Bottom-up
Bauteilpuffer leer	110	Bauteilpuffer leer	variabel	Bottom-up
Materialpuffer leer	120	Materialpuffer leer	variabel	Bottom-up
Bauteil verklemmt	130	Bauteil in Anlage verklemmt	variabel	Bottom-up
Anlagenausfall	210	Ungeplanter Ausfall einer Anlage	variabel	Bottom-up
Anlagenreparatur	220	Reparatur einer Anlage	variabel	Bottom-up

Anlagenwartung	250	Geplante Wartung einer Anlage	Fest vorgegeben oder variabel	Top-down oder Bottom-up
----------------	-----	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------

5.5 Kennzahlensystem

Die Regelkreise der Arbeitssteuerung („Steuerungskreis“) und der Arbeitsplanung („Planungskreis“) bilden die Grundlage für eine Bewertung und iterative Optimierung durch Parameterstudien oder Szenarioanalysen (vgl. Abbildung 5-1). Auf dieser Grundlage kann die Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung erfolgen. Hierfür ist es erforderlich, verschiedene Parametersätze in geeigneter Weise unter Berücksichtigung mehrerer Zielgrößen miteinander zu vergleichen und zu bewerten. Diese wesentliche Anforderung wird durch ein geeignetes Kennzahlensystem umgesetzt (vgl. Abbildung 5-16).

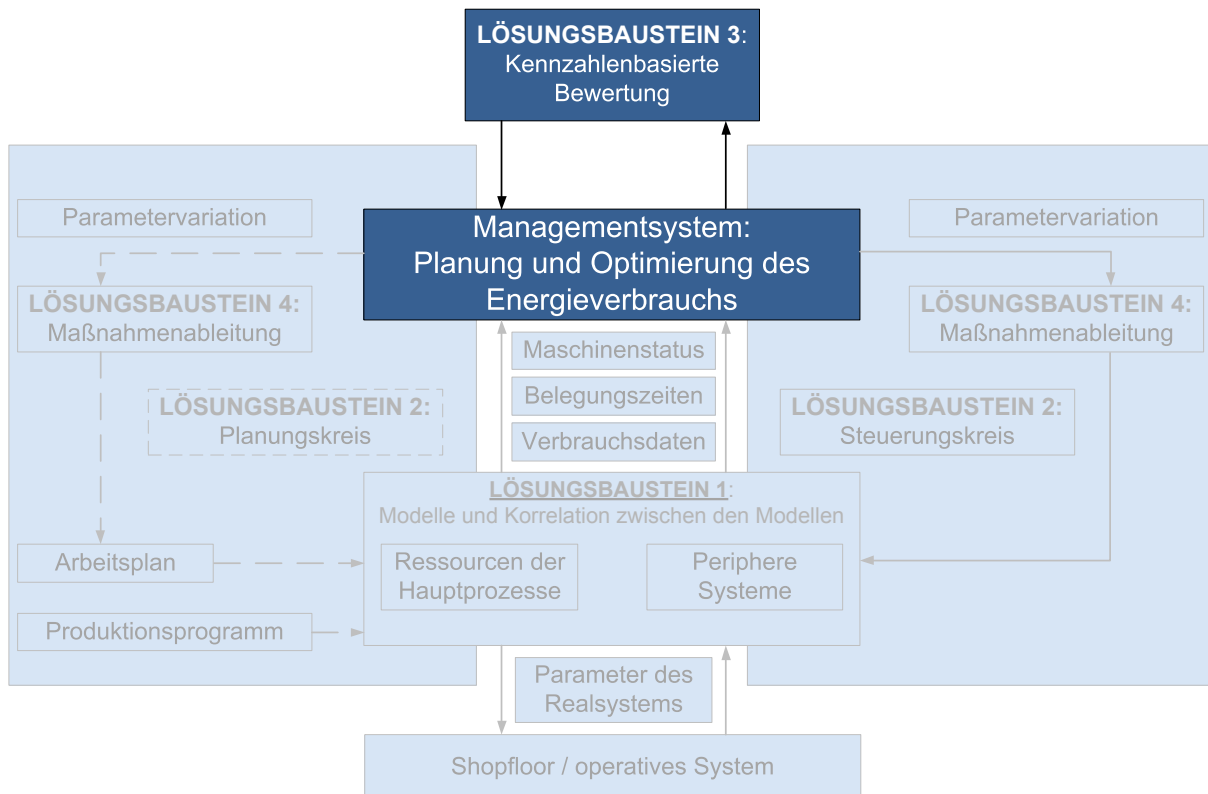


Abbildung 5-16: Lösungsbaustein „Kennzahlensystem“ im Kontext der Gesamtmethodik

Da eine Vielzahl unterschiedlicher Kennzahlen existiert (vgl. Kapitel 2), ist eine Auswahl geeigneter Kennzahlen zu treffen und zu einem Kennzahlensystem zusammenzuführen. Dieses bildet die Basis für die Ableitung einer Gütefunktion des betrachteten Systems zur energetischen Optimierung.

In einem weiteren Schritt wird das in Kapitel 5.3 entwickelte Modell mit dem Kennzahlensystem gekoppelt. Diese Vorgehensweise ermöglicht die kennzahlenbasierte Bewertung verschiedener Parametersätze und bildet die Grundlage für eine spätere energetische Optimierung der Produktion.

In Abbildung 5-17 wird die gewählte und in den folgenden Abschnitten verwendete Benennung bei der Entwicklung des Kennzahlensystems beschrieben: Es wird bei jeder Kennzahl neben der Bezeichnung auch die Zieldimension, die periphere Ordnung sowie die Möglichkeit zur Beeinflussung angegeben.

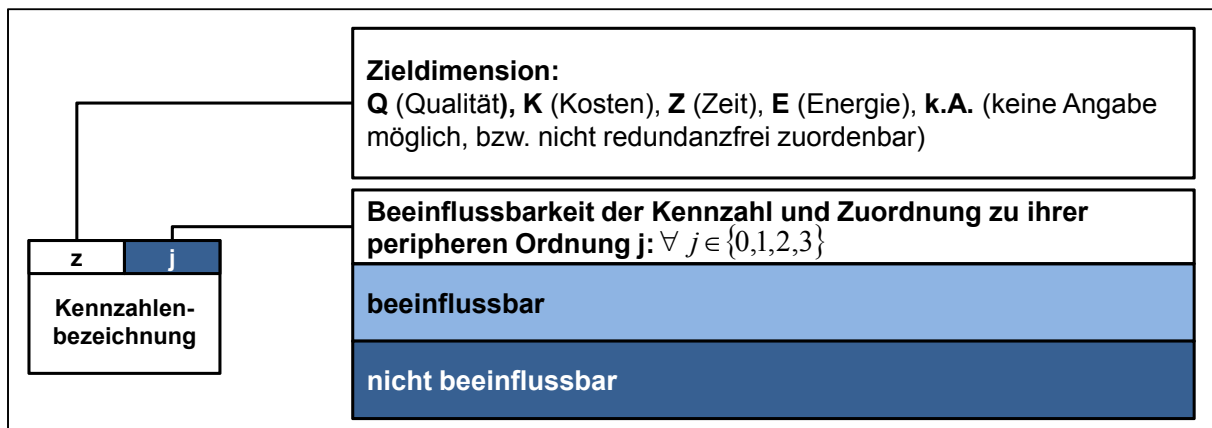


Abbildung 5-17: gewählte Benennung im Kennzahlensystem

5.5.1 Entwicklung eines Kennzahlensystems

In Kapitel 2 wurden eine Vielzahl von unterschiedlichen Kennzahlen vorgestellt sowie deren allgemeine Vor- und Nachteile beschrieben. Außerdem wurden sie in Bezug auf die Aufgabenstellung dieser Arbeit hin bewertet (vgl. Abbildung 2-13). Diese Bewertung dient als Ausgangsbasis für die Auswahl geeigneter Kennzahlen. Aufbauend darauf wird ein an die Problemstellung angepasstes Kennzahlensystem entwickelt. In einem ersten Schritt werden die Kennzahlen an die Aufgabenstellung angepasst:

Spezifischer Energieverbrauch

Eine Analyse der Bewertungskriterien von Kennzahlen zeigt, dass insbesondere der „spezifische Energieverbrauch“ als zentrale Größe zur Bewertung der Energieeffizienz in Unternehmen beschrieben werden kann (vgl. Kapitel 2). Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, kann diese Energiekennzahl auf verschiedene Fragestellungen angewandt werden.

Formal-mathematischer Ansatz:

$$W_{spez} = \frac{W_{gesamt}}{m_{Gutteil}} = \frac{W_{gesamt}}{m \times \eta_{Qualität}} \quad \text{Formel 5-3}$$

Aus Formel 5-3 geht hervor, dass es sich beim spezifischen Energieverbrauch W_{spez} um eine aggregierte Kennzahl handelt, die eine Aussage über das zu betrachtende System zulässt. Im Rahmen dieser Arbeit wird der spezifische Energieverbrauch durch eine weitere Detaillierung mit dem Modell der peripheren Ordnung nach *Schenk und Wirth* (vgl. Kapitel 2) in Bezug gesetzt. Daraus folgt, dass diese Kennzahl als zentrale Größe verwendet werden kann, jedoch einen methodischen Unterbau erfordert, mit dem eine durchgängige Ermittlung der benötigten Daten ermöglicht wird.

Der Energiebedarf einer Produktion lässt sich nach *Kruska* sowie *Schenk und Wirth* (vgl. Kapitel 2) nach folgender Formel berechnen:

$$W_{gesamt} = W_{Hauptprozess} + W_{1.Peripherie} + W_{2.Peripherie} + W_{3.Peripherie} \quad \text{Formel 5-4}$$

Gemäß Formel 5-4 wird im Folgenden zwischen der Auswahl von Kennzahlen zur Bewertung der Ressourcen der Hauptprozesse und Kennzahlen zur Bewertung der peripheren Systeme unterschieden:

5.5.1.1 Kennzahlen zur Bewertung der Ressourcen der Hauptprozesse

Als grundlegende Modellierungsmethodik wird die in Kapitel 5.2 vorgestellte statusbasierte Modellierung der Ressourcen verwendet. Dabei werden jeder zu betrachtenden Ressource Zustände und eine zustandsspezifische Leistung zugeordnet. Hieraus erfolgt die Berechnung des Energieverbrauchs. Dieser Ansatz wird auch bei der Kennzahlenbildung berücksichtigt.

Der Energiebedarf für eine Ressource der Hauptprozesse kann somit durch folgende Formel berechnet werden:

$$W_{Hauptprozess} = \sum_{z=1}^z (P_{z,Hauptprozess} \times t_{z,Hauptprozess}) \quad \text{Formel 5-5}$$

Hierbei wird der Tatsache, dass die Maschinen in den verschiedenen Zuständen eine unterschiedliche elektrische Leistungsaufnahme haben, Rechnung getragen. Die Zustände werden in Anlehnung an Kapitel 5.2 festgelegt. In dieser Berechnung werden sowohl der ressourcenspezifische als auch der prozessspezifische Anteil am Energieverbrauch berücksichtigt.

Einen wichtigen Faktor stellen die Zeitanteile t_z dar, in welchen die Zustände anliegen, denn die Zeitanteile können einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch einer Ressource haben (vgl. Kapitel 5.4). Bei der Festlegung dieser Zeitanteile wird auf der Definition nach REFA aufgebaut,

die in Kapitel 2 detailliert erläutert wurde. Die Kennzahl des spezifischen Energieverbrauchs setzt sich somit für jede Ressource der Hauptprozesse gemäß Abbildung 5-18 zusammen:

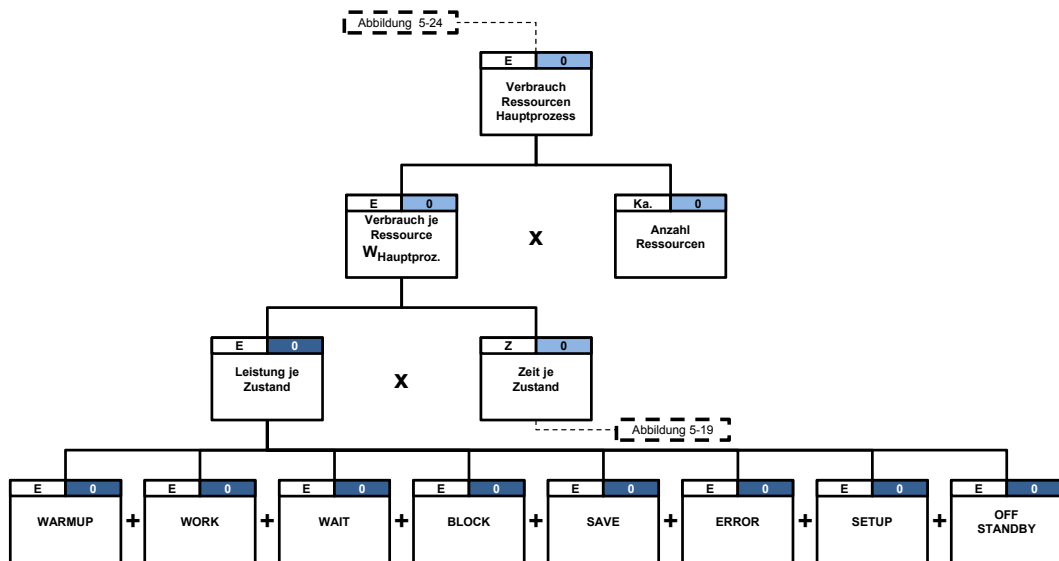


Abbildung 5-18: Zusammensetzung der Kennzahl „Energieverbrauch Hauptprozess“

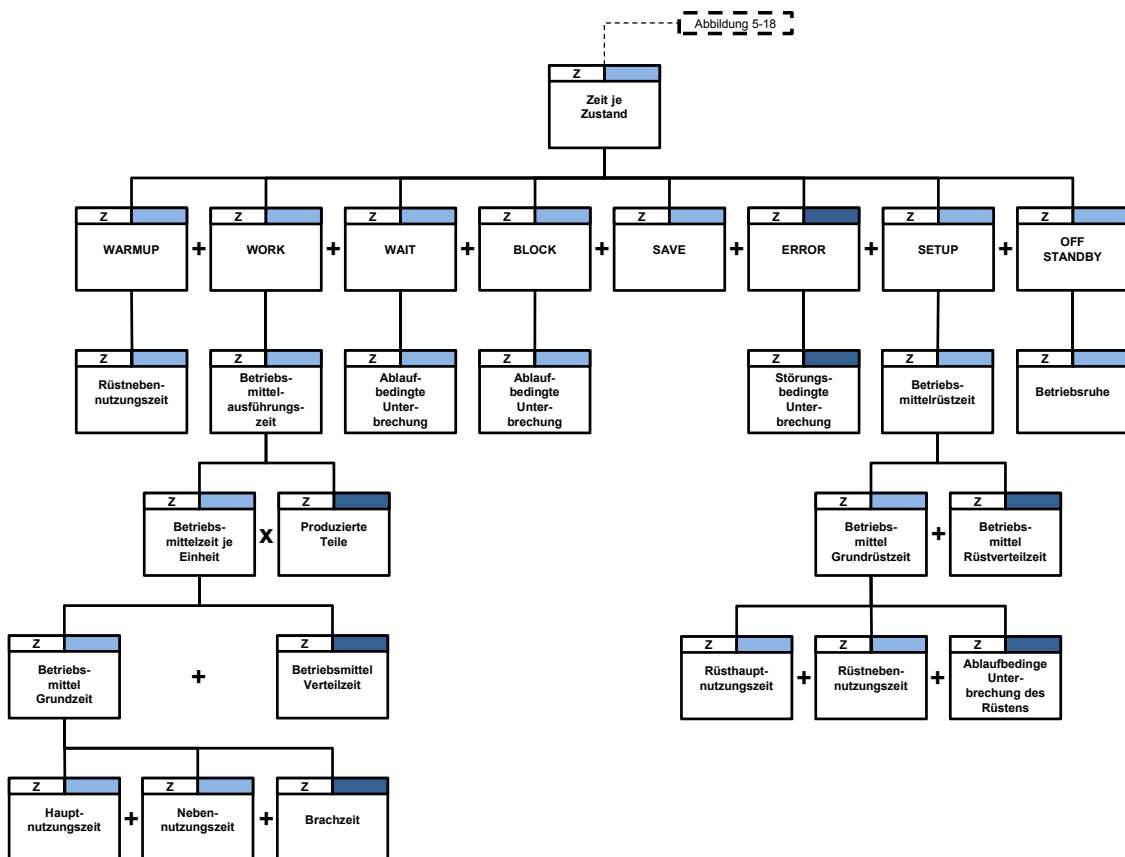


Abbildung 5-19: Zuordnung von REFA-Vorgabezeiten zu den Zeitanteilen der Zustände

Insbesondere die konsistente Erfassung der Zeitanteile und die Zuordnung zu einem Zustand sind von großer Wichtigkeit (vgl. Kapitel 5.4). Die formale Zuordnung kann der Abbildung 5-19 entnommen werden. Sie dient lediglich als Orientierungshilfe für die konsistente Zuordnung der Ist-Zeiten zu den REFA-Vorgabezeiten.

Bewertung der Kennzahl „Energieverbrauch Hauptprozess“ ($W_{\text{Hauptprozess}}$):

Die Kennzahl $W_{\text{Hauptprozess}}$ basiert auf einer Vielzahl von Eingangsgrößen. Aus diesem Grund ist die Aussagefähigkeit direkt von der Qualität der ermittelten Daten abhängig (vgl. Kapitel 2). Die Zuordnung der Zeitanteile nach REFA ist in der Praxis nicht immer möglich, da die Zeiten häufig nicht durchgängig oder eindeutig in das REFA-System eingeteilt werden können. Aus diesem Grund ist eine konsistente und permanente Definition der Zeitanteile bei der Datenerhebung von zentraler Bedeutung. Wie in Kapitel 5.4 verdeutlicht, umfasst $W_{\text{Hauptprozess}}$ sowohl den prozessspezifischen Energieverbrauch W_{Prozess} als auch den ressourcenspezifischen Energieverbrauch $W_{\text{Ressource}}$.

5.5.1.2 Kennzahlen zur Bewertung der peripheren Systeme

Die peripheren Systeme können für einen Großteil des Energiebedarfs in der Produktion verantwortlich sein und sind sowohl in ihrem Aufbau als auch in ihrer Anordnung sehr heterogen (vgl. Kapitel 2). Das hat zur Folge, dass im Rahmen dieser Arbeit eine methodische Grundlage zur Bewertung der Peripherie erarbeitet wird. Die tatsächliche Anpassung ist anlagen- und unternehmensspezifisch durchzuführen.

Folgende periphere Systeme werden im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt (vgl. Kapitel 1 und Kapitel 5.2):

- zentrales Kühlschmierstoff Bereitstellungs- und Aufbereitungssystem (KSS-System)
- Druckluftbereitstellungssystem
- Beleuchtungssystem
- Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystem (HLK-System)

Der methodische Ansatz erfolgt analog zur Modellierung der Ressourcen der Hauptprozesse. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die peripheren Systeme je nach ihrer peripheren Ordnung eine Abhängigkeit zu den Hauptprozessen aufweisen. Außerdem verfügen sie häufig noch nicht über die Möglichkeit, Betriebsdaten zu erfassen und auszutauschen (vgl. Abschnitt 2.5.2)

KSS-System:

Das KSS-System ist als Verbraucher der ersten Peripherie direkt vom Produktionsprogramm abhängig (vgl. Kapitel 2). Die Berechnung der Kennzahl des „Energieverbrauchs des KSS-Systems“ ist analog zu dem der Ressourcen der Hauptprozesse möglich:

$$W_{KSS} = \sum_{z=1}^Z (P_{z,KSS} \times t_{z,KSS})$$

Formel 5-6

Daraus ergibt sich eine Zusammensetzung der Kennzahl gemäß Abbildung 5-20:

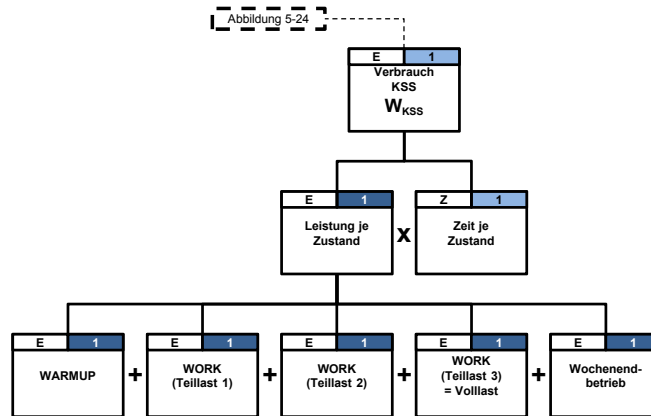


Abbildung 5-20: Zusammensetzung der Kennzahl für das KSS-System

Die Definitionen der einzelnen Zustände sind in Abschnitt 5.2.3 detailliert erläutert.

Druckluftbereitstellungssystem:

Das System zur Erzeugung und Bereitstellung von Druckluft zählt zu einem typischen System der zweiten peripheren Ordnung. Formal-mathematisch kann die Kennzahl des Energieverbrauchs der Druckluftversorgung wie folgt beschrieben werden:

$$W_{Druckluft} = \sum_{z=1}^Z (P_{z,Druckluft} \times t_{z,Druckluft})$$

Formel 5-7

Der wesentliche elektrische Verbraucher einer Druckluftanlage ist der Kompressor, der die Luft auf den notwendigen Arbeitsdruck komprimiert. Dieser Prozess ist in der Realität mit erheblichen Verlusten behaftet (vgl. Kapitel 2). Häufig kommen Mehrkompressorensysteme zum Einsatz, zu deren Beschreibung ein Teillastbereich definiert wurde (vgl. Kapitel 5.2.3). Die zu berechnende Kennzahl ergibt sich aus Abbildung 5-21:

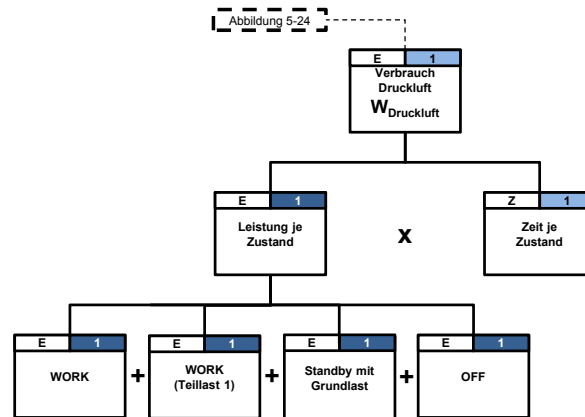


Abbildung 5-21: Zusammensetzung der Kennzahl für das Druckluftbereitstellungssystem

HLK-System

Das Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystem kann der dritten Peripherie zugeordnet werden. Da es sich allgemein um ein sehr komplexes System handelt, wird die HLK-Anlage nochmals in Subsysteme aufgeteilt (vgl. Abschnitt 2.2.2 und 5.2.3). Daraus resultiert, dass auch bei der Kennzahlenbildung zwischen Luftförderungssystem (Lüftung), Kühlungssystem (Kühlung) und Heizungssystem (Heizung) unterschieden wird (vgl. Abbildung 5-22).

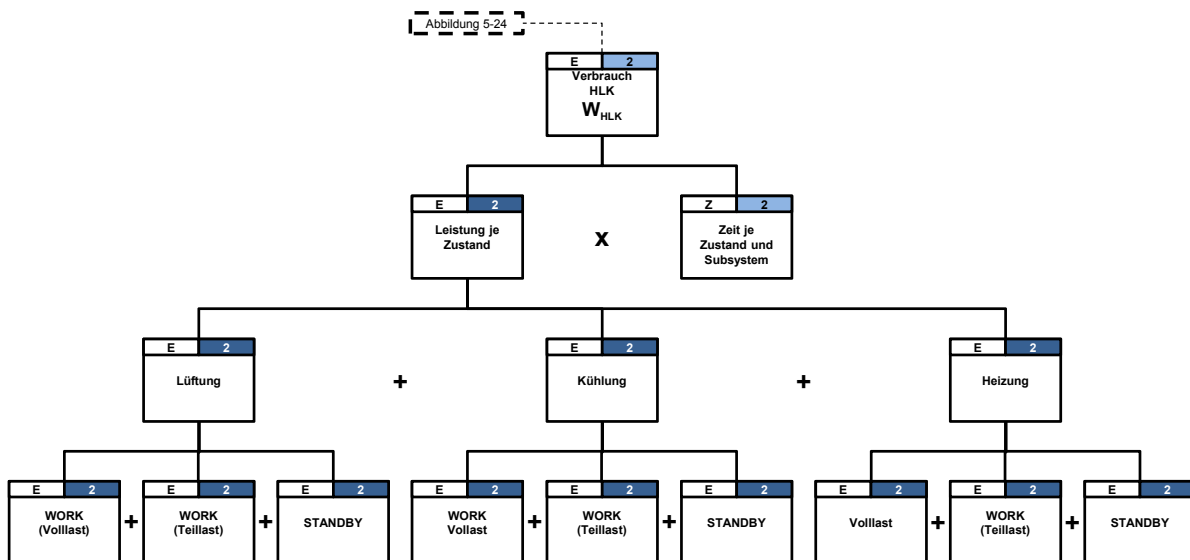


Abbildung 5-22: Aufteilung der HLK in Subsysteme

Hierbei wird jedes betrachtete Subsystem formal-mathematisch nach Formel 5-8 beschrieben:

$$W_{HLK,i} = \sum_{z=1}^Z P_{z,HLK,i} \times t_{z,HLK,i} \tag{Formel 5-8}$$

Beleuchtungssystem:

Das Beleuchtungssystem ist als peripheres System der dritten Ordnung unabhängig von den Ressourcen der Hauptprozesse (vgl. Kapitel 2). Als Beleuchtungseinrichtungen kommen in der Produktion häufig z.B. Leuchtstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten zum Einsatz, welche nicht gedimmt werden können (vgl. Kapitel 2). Formel 5-9 stellt den formal-mathematischen Ansatz zur Berechnung dar. Der Aufbau der Kennzahl ist Abbildung 5-23 zu entnehmen:

$$W_{Beleuchtung} = \sum_{z=1}^Z (P_{z,Beleuchtung} \times t_{z,Beleuchtung}) \tag{Formel 5-9}$$

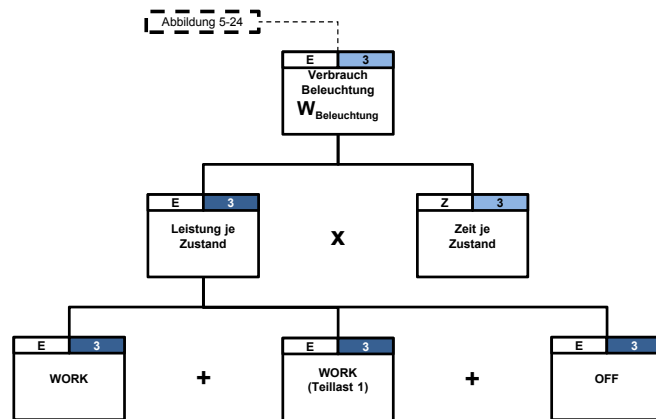


Abbildung 5-23: Zusammensetzung der Kennzahl für das Beleuchtungssystem

Die vorgestellten Kennzahlen dienen der Ermittlung des Energieverbrauchs der betrachteten peripheren Systeme. Sie sind somit von zentraler Bedeutung zur Ermittlung der übergeordneten Kennzahlen und zur energetischen Bewertung der gesamten Produktion.

5.5.1.3 Weitere Kennzahlen

Effizienzgrad

Die Aussagekraft der oben genannten Kennzahl W_{spez} ist begrenzt, da die Berechnung keinen Vergleich mit einem Referenzsystem zulässt. Das bedeutet, eine Interpretation der ermittelten Größe des Energieverbrauchs (W_{spez}) ist nicht direkt möglich. Aus diesem Grund ist die Verwendung der Spitzenkennzahl „Effizienzgrad“ zielführend, da ein Bezug zu einer Referenzgröße ermöglicht wird.

Der Effizienzgrad als Kennzahl weist durch die Berücksichtigung von einer Vielzahl von Faktoren eine multikriterielle Tendenz auf und eignet sich somit für eine umfassende energetische Betrachtung.

Die allgemeine Berechnung erfolgt nach Formel 2-15. Wie aus dem formal-mathematischen Ansatz ersichtlich, ist die Ermittlung eines geeigneten Referenzwertes W_{ref} von Bedeutung für die Aussagekraft der Kennzahl „Effizienzgrad“ (EG). Der Referenzwert stellt dabei einen Vergleichswert dar, der zur Bewertung der eigenen Leistungsfähigkeit dient. Eine geeignete Methode zur Bestimmung eines Referenzsystems wird in Kapitel 5.5.2 vorgestellt.

Die oben genannten Ausführungen führen zu folgender Formel 5-10, welche im Rahmen dieser Arbeit für die Bewertung der Energieeffizienz verwendet wird. Hierbei wird der spezifische Energieverbrauch auf die Einheit „produzierte Gutteile“ bezogen:

$$Effizienzgrad = \frac{W_{ref}}{W_{spez}} = \frac{W_{ref}}{\frac{W_{gesamt}}{m_{Gutteil}}} = \frac{W_{ref} \times m \times \eta_{Qualität}}{W_{Hauptproz.} + W_{1.Perip.} + W_{2.Perip.} + W_{3.Perip.}} \quad \text{Formel 5-10}$$

OEE und weitere Zielkriterien zur Bewertung der Szenarien

Das Kennzahlensystem mit der Spitzenkennzahl „Effizienzgrad“ eignet sich zur energetischen Optimierung einer Produktion. Eine isolierte Betrachtung der Energieeffizienz ist jedoch nicht zielführend, da konkurrierende Zielgrößen unbeachtet bleiben. Somit müssen die klassischen Zielgrößen der Produktion mit berücksichtigt und in das Kennzahlensystem integriert werden (vgl. Kapitel 2).

Das bedeutet, im Einzelnen gilt es,

- eine hohe Auslastung der Ressourcen bei
- geringer Durchlaufzeit zu erzielen.
- Eine hohe Qualität und wenig Ausschuss zu produzieren.
- Niedrige Bestände zu haben, sowie
- eine hohe Termintreue und kurze Lieferzeiten zu erreichen.

Diese Faktoren dürfen auch bei der energetischen Bewertung einer Produktion nicht unberücksichtigt bleiben.

Um dem Planer oder Betreiber einer Produktion einen Überblick über den Zustand des zu untersuchenden Systems zu geben, werden folglich zusätzliche Kennzahlen gebildet.

Der Aspekt der hohen Qualität und der hohen Auslastung der Ressourcen kann durch die OEE beschrieben werden. Diese setzt sich aus Qualitätsgrad, Leistungsgrad sowie Nutzungsgrad zusammen und lässt als standardisierte Kennzahl in der Produktion eine Aussage über Leistungsfähigkeit der Produktion zu (vgl. Kapitel 2 und Formel 2-17).

Der Aspekt der niedrigen Bestände kann durch die Ermittlung des optimalen Bestands und den Vergleich zwischen optimalem Bestand und Ist-Bestand ermittelt werden.

Die zeitlichen Aspekte können durch die explizite Berücksichtigung der Durchlaufzeiten integriert werden.

Somit ergibt sich das in Abbildung 5-24 dargestellte Kennzahlensystem, welches zur energetischen Bewertung und Optimierung einer Produktion unter Berücksichtigung der klassischen Zielgrößen verwendet werden kann. Optimale Bestände, Durchlaufzeit und Termintreue können somit in der Optimierung explizit mit einbezogen werden.

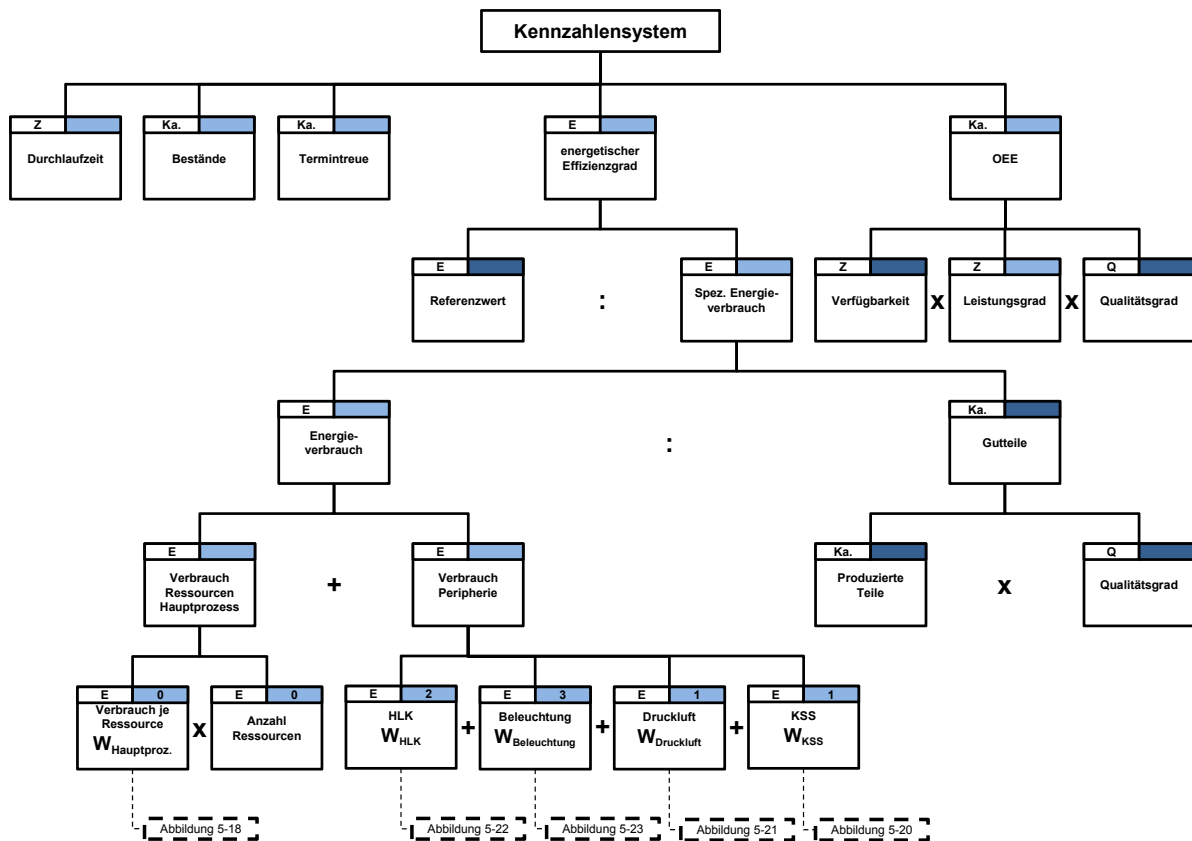


Abbildung 5-24: Kennzahlensystem zur Energieoptimierung

5.5.1.4 Fazit

Das für diese Arbeit entwickelte Kennzahlensystem wird in Form eines Rechensystems ausgeführt. Dieses hat im Gegensatz zu einem Ordnungssystem den Vorteil, dass sich die Kennzahlen mathematisch zerlegen oder berechnen lassen. Die einzelnen Kennwerte basieren auf mathematischen Zusammenhängen, wodurch qualitative Größen minimiert werden und ein belastbares Fundament für eine Reproduzierbarkeit der Kennzahlen geschaffen wird (vgl. Kapitel 2).

Es erfüllt somit die untersuchten Kriterien zur Beurteilung von Kennzahlen und eignet sich zur Bewertung des Energieverbrauchs im Rahmen des gewählten Ansatzes unter Einbeziehung der klassischen Zielgrößen in der Produktion. Somit wird der Forderung Rechnung getragen, die Energieein-

sparung nicht als isolierte Kenngröße, sondern im Gesamtzusammenhang mit der Leistungsfähigkeit der Produktion zu betrachten.

5.5.2 Methode zur Bildung eines Referenzsystems

Die gewählte Spitzenkennzahl „Effizienzgrad“ wird durch die Berechnung des Quotienten von spezifischem Energieverbrauch des betrachteten Systems und eines Referenzsystems bestimmt (vgl. Kapitel 2, Formel 2-15).

Die geeignete Methode zur Bestimmung eines Referenzsystems ist somit von zentraler Bedeutung für die Aussagekraft der Kennzahl.

In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zur Bestimmung von Referenzwerten (vgl. Kapitel 3). Diese Methoden sind jedoch isoliert betrachtet im Rahmen des hier gewählten Ansatzes nur bedingt geeignet, da mit diesen das dynamische Verhalten des Gesamtsystems schwer erfassbar ist.

Um dieses Defizit zu beheben, ist die modellhafte Abbildung des existierenden Realsystems zur Ermittlung eines Referenzsystems im Sinne eines Bezugssystems erforderlich. Die Ermittlung des Effizienzgrades zu einem diskreten Zeitpunkt kann als Referenzpunkt angesehen werden, auf den sich spätere Szenarien beziehen. Wichtig ist, dass der einmalig ermittelte Energieverbrauch des Referenzsystems nicht nachträglich willkürlich geändert wird, da sonst der zwingend erforderliche einheitliche Bezugspunkt verlorengeht.

Wenn dieser Aspekt berücksichtigt wird, eignet sich diese Vorgehensweise für einen unternehmensinternen Optimierungsprozess im Rahmen dieser Arbeit. Ein Branchenvergleich oder eine branchenübergreifende Vergleichbarkeit kann damit jedoch nicht erreicht werden.

Im Zuge dieser Arbeit werden bei der Ermittlung eines Referenzsystems die bestehenden Methoden kombiniert. Daraus resultiert folgende Vorgehensweise zur Ermittlung:

1. Verwenden der Modelle einer bestehenden Fertigung und Befüllen mit gemessenen Verbrauchsdaten aus der Vergangenheit zur Bestimmung von $W_{ref(t)}$.
2. Wahl einer geeigneten Zeitperiode t , für die die Betrachtung durchgeführt wird.
3. Vorgabe eines periodenbezogenen (z.B. jährlichen) prozentualen Einsparpotentials x .

Die Kombination der beiden Punkte ergibt nach Formel 5-11 den Energiebedarf des Referenzsystems zu einem beliebigen Zeitpunkt:

$$W_{ref(t+1)} = W_{ref(t)} \times (1 - x)$$

Formel 5-11

Bei dieser Vorgehensweise ist zu berücksichtigen, dass der Referenzenergiebedarf in Abhängigkeit der konkreten Fragestellung entweder für den gesamten Betrachtungsraum oder für die einzelnen peripheren Ordnungen oder die Partialsysteme ermittelt werden kann. Außerdem ist darauf zu achten, dass sich bei der Ermittlung von $W_{\text{ref}(t)}$ das System in einem eingeschwungenen Zustand befindet.

5.6 Prototypische Softwareumsetzung

Die Modellierung, Simulation und Bewertung der unterschiedlichen Szenarien erfolgt im Materialfluss-Simulationssystem Plant Simulation der Siemens AG (vgl. Abbildung 6-10). Die Parametrierung und Visualisierung wird über eine Schnittstelle zu Datenbanken umgesetzt.

In Plant Simulation ist es möglich, über Methoden die peripheren Bereiche zu modellieren und sie mit den Ressourcen der Hauptprozesse zu verknüpfen. Methoden erlauben zudem die Integration von energetischen Aspekten. Außerdem können verschiedene organisatorische Parameter wie z.B. unterschiedliche Schichtsysteme mit einbezogen und deren Einfluss auf das energetische Verhalten untersucht werden. Da der Materialfluss bei diesem Werkzeug im Vordergrund steht, können sehr gut verschiedene Produktionslayouts modelliert und simuliert werden. Über externe Schnittstellen ist es möglich, benötigte Input-Parameter wie z.B. energetische Felddaten, Rüst-, Bearbeitungs- und Ausfallzeiten sowie den Produktmix in Datenbanken abzulegen und automatisiert in das System zu übernehmen. Zudem ist ein direktes Auslesen von SPS-Daten über den in Plant Simulation integrierten OPC-Client möglich. Durch die OPC-Kommunikation können Ressourcen direkt mit energetischen Felddaten parametrierbar werden. Auch eine direkte Anbindung eines konkreten Arbeitsplans oder eine Kopplung mit der F-EIDL Methodik (vgl. Kapitel 5.5.2) ist über Methoden durchführbar. Außerdem können über die Schnittstellen relevante Informationen wie z.B. Maschinenstatus und Zeiten aus dem Simulationsprogramm in Datenbanken exportiert werden. Es findet also eine bidirektionale Kommunikation zwischen der Datenbank und dem Simulationssystem statt. Die Umsetzung der Kommunikation erfolgt über eine DDE-Schnittstelle („Dynamic Data Exchange“). Hierbei handelt es sich um ein Protokoll, mit dem dynamische Daten zwischen zwei Anwendungsprogrammen ausgetauscht werden können. Die zusätzliche Integration des Kennzahlensystems ermöglicht eine Bewertung der Simulationsläufe.

5.7 Methode zur Optimierung der Energieeffizienz

Durch die Modellierung von Regelkreisen für die Arbeitsplanung (Planungskreis) sowie die Arbeitssteuerung (Steuerungskreis) ist es möglich, durch verschiedene Methoden ein energetisches Optimum aus vorgegebenen Alternativen für das betrachtete System zu ermitteln (vgl. Abbildung 5-25). Außerdem ist es bereits in der Arbeitsplanung möglich, Auswirkungen auf das spätere energetische Verhalten der zu planenden Produktion zu untersuchen und Alternativen hinsichtlich ihres zu erwartenden Energiebedarfs gegenüberzustellen. Als Optimierungsmöglichkeiten kommen hierfür die Parametervariation sowie die Szenarioanalyse zum Einsatz:

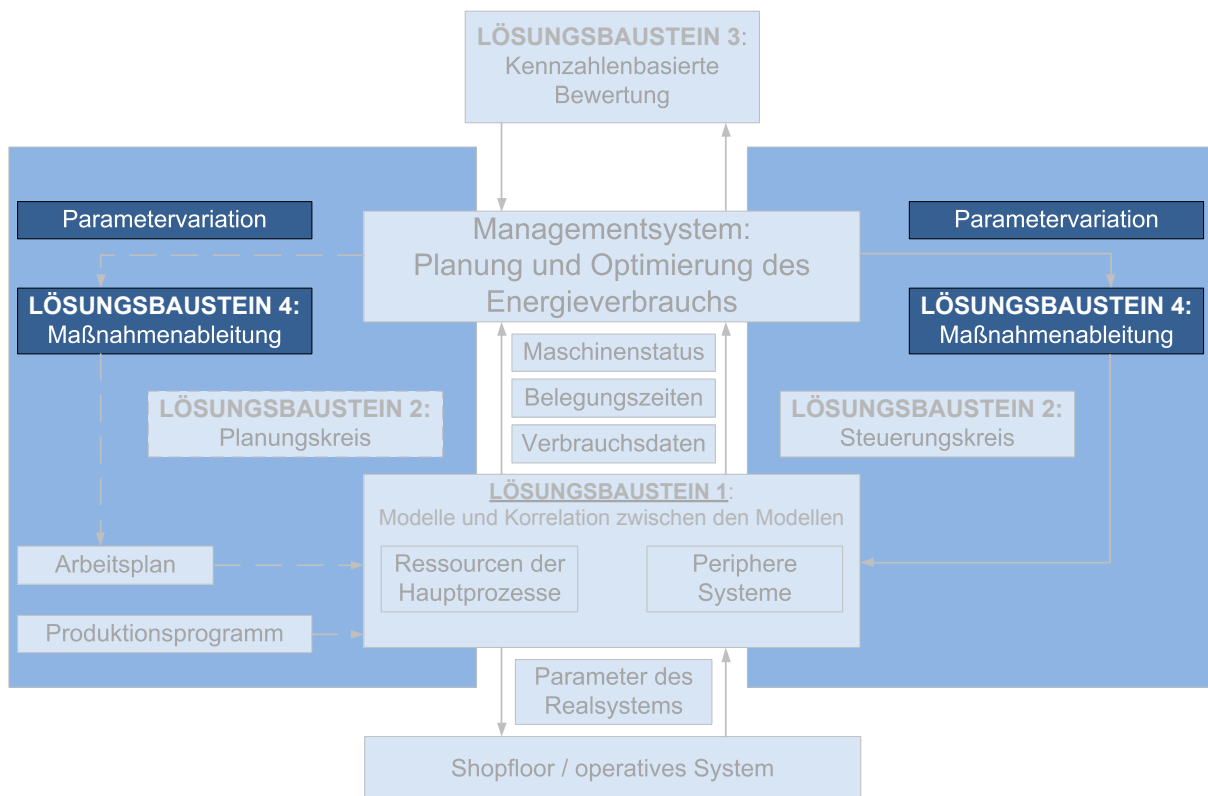


Abbildung 5-25: Lösungsbaustein „Optimierung und Maßnahmenableitung“ im Kontext der Gesamtmethodik

Die Parametervariation wird in diesem Zusammenhang zur Ermittlung der bestmöglichen Parameterkonstellation unter vorgegebenen Freiheitsgraden und Randbedingungen verwendet. Die Szenarioanalyse dient der Bewertung verschiedener Szenarien, die in der Zukunft auftreten können. Um eine Optimierung vornehmen zu können, ist eine unternehmens- und zielspezifische Gütefunktion zu definieren, die eine Priorisierung der in Kapitel 5.5 genannten, teilweise konkurrierenden Zielgrößen zulässt. Diese kann von den Spitzenkennzahlen des in dieser Arbeit entwickelten Kennzahlensystems abgeleitet werden. Sie umfasst neben dem energetischen Effizienzgrad die OEE, die

Durchlaufzeit, den Bestand im System sowie die Termintreue einer Auftragsabarbeitung. Jeder dieser Faktoren wird mit einem spezifischen Gewichtungsfaktor multipliziert. Dadurch können die Sensitivitäten der genannten Kriterien beliebig variiert und aufgabenspezifisch angepasst werden. Alternativ ist mit der erarbeiteten Methodik auch eine reine energetische Optimierung möglich, bei der nur auf einen möglichst hohen energetischen Effizienzgrad hin optimiert wird.

Die resultierende allgemeine Gütefunktion, die die genannten Einflussgrößen berücksichtigt, ergibt sich aus der Formel 5-12:

$$\max z = \sum w_i k_i = \left[(w_{EG} \times k_{EG}) + (w_{OEE} \times k_{OEE}) + (w_{DLZ} \times k_{DLZ}) \right] \\ + (w_{Bestand} \times k_{Bestand}) + (w_{Termin} \times k_{Termin}) \quad \text{Formel 5-12}$$

Alle genannten Kriterien sind dimensionslos und liegen im Intervall zwischen null und eins (0% bis 100%). Es wird von linearen Faktoren ausgegangen, Nichtlinearitäten bleiben unberücksichtigt. Sind die Kriterien größer als eins, bedeutet das, dass der Ist-Zustand besser als der gewählte Referenzzustand bzw. Soll-Zustand ist.

Alle Kriterien sind in gleicher Weise aufgebaut und bilden den Quotienten zwischen optimalem (oder Soll- bzw. Referenz-) Wert und vorliegendem Ist-Wert.

Das Gütekriterium für den energetischen Effizienzgrad ergibt sich direkt aus der Kennzahl:

$$k_{EG} = \text{Effizienzgrad} = \frac{W_{ref}}{W_{spez}} \quad \text{Formel 5-13}$$

Auch als Gütekriterium für die OEE kann unmittelbar die Kennzahl OEE verwendet werden. Somit gilt:

$$k_{OEE} = OEE = \eta_{Nutzung} \times \eta_{Leistung} \times \eta_{Qualität} \quad \text{Formel 5-14}$$

Da angestrebt wird, Bestände und Durchlaufzeit minimal zu halten, ergeben sich die Gütekriterien k_{DLZ} und $k_{Bestand}$ nicht direkt aus den Kennzahlen. Das Gütekriterium für die Termintreue bildet die Zeitspanne zwischen dem angestrebten und dem tatsächlichen Fertigstellungstermin ab.

Somit gelten für die Gütekriterien DLZ, Bestände und Termintreue folgende Formeln:

$$k_{DLZ} = \frac{DLZ_{SOLL}}{DLZ_{IST}} = \frac{\sum_1^{m_s} T_D}{DLZ_{IST}} \quad \text{Formel 5-15}$$

Das Gütekriterium für die Durchlaufzeit wird folglich aus dem Quotienten der Summe der einzelnen Soll-Durchlaufzeiten und der Ist-Durchlaufzeit gebildet. Je näher sich die tatsächliche Durchlaufzeit dem Soll-Wert annähert, desto größer wird k_{DLZ} . Die Berechnung der Soll-Durchlaufzeit T_D erfolgt hierbei nach Formel 2-16.

Das Gütekriterium für die Bestände wird aus dem Quotienten zwischen Idealbestand und Ist-Bestand gebildet, wobei als Bedingung gilt, dass die tatsächlichen Bestände größer oder gleich der Soll-Bestände sind. Bezüglich der Optimierung gilt somit analog zur Durchlaufzeit, dass ein Annähern der vorhandenen Bestände an die Soll-Bestände zu einer Erhöhung des Kriteriums k_{Bestand} führt.

$$k_{\text{Bestand}} = \frac{\text{Bestand}_{\text{OPT}}}{\text{Bestand}_{\text{IST}}} = \frac{\text{Bestand}_{\text{SOLL}}}{\text{Bestand}_{\text{IST}}} = \frac{\text{Bestand}_{\text{SOLL}}}{\text{Bestand}_{\text{SOLL}} + |\text{Bestand}_{\text{IST}} - \text{Bestand}_{\text{SOLL}}|} \quad \text{Formel 5-16}$$

Auch das Gütekriterium für die Termintreue wird durch die Gegenüberstellung von Soll-Wert und Ist-Wert (bzw. Soll-Termin und Ist-Termin) gebildet und bewirkt durch eine Annäherung des Ist-Termins an den Soll-Termin eine Erhöhung des Gütekriteriums k_{Termin} .

$$k_{\text{Termin}} = \frac{t_{\text{SOLL}}}{t_{\text{IST}}} = \frac{t_{\text{Bearbeitungszeit,SOLL}}}{t_{\text{Bearbeitungszeit,SOLL}} + |t_{\text{Bearbeitungszeit,IST}} - t_{\text{Bearbeitungszeit,SOLL}}|} \quad \text{Formel 5-17}$$

Die Gewichtungsfaktoren (w_i) sind spezifisch zu wählen. Wenn ein Kriterium nicht berücksichtigt werden soll, ist als Gewichtungsfaktor „null“ zu wählen. Die gewichtete Summe der einzelnen Gütekriterien bildet die Gütefunktion ab. Ziel ist es, durch eine Parametervariation das Maximum dieser Funktion zu bestimmen oder durch eine Szenarioanalyse das bestmögliche Szenario unter bestimmten vorgegebenen Annahmen zu ermitteln. Die relative Gewichtung der Faktoren zueinander kann methodisch durch einen paarweisen Vergleich vorgenommen werden, bei dem die einzelnen Faktoren in ihrer Wichtigkeit zueinander in Bezug gesetzt werden (vgl. Abbildung 5-26).

Lfd. Nr.	Spezifische Gewichtungsfaktoren	Lfd. Nr.							Gewichtung G		Platz
		1	2	3	4	5	6	7	Pkt.	%	
1	A: energetischer Effizienzgrad										
2	B: OEE										
3	C: Durchlaufzeit										
4	D: Bestand im System										
5	E: Termintreue										
6	F:										
7	G:										
Summe Punkte:											
Punkteverteilung: 2 : 0 = 1. Kriterium wichtiger als 2. Kriterium 1 : 1 = 1. Kriterium gleich wichtig wie 2. Kriterium 0 : 2 = 1. Kriterium weniger wichtig wie 2. Kriterium											

Abbildung 5-26: Paarweiser Vergleich zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren der Gütefunktion

5.7.1 Optimierung in der Arbeitsplanung / Planungskreis

Die Untersuchung von Einflussgrößen auf den Energiebedarf der Produktion im Rahmen der Arbeitsplanerstellung und der Operationsplanung in Kapitel 5.4 macht deutlich, dass einzelne Planungsschritte einen unterschiedlich starken Einfluss auf das energetische Verhalten eines Systems haben (vgl. Abbildung 5-12).

Da es meist nicht möglich ist, einen Einflussparameter isoliert zu betrachten und zu optimieren, wird auf Basis der ermittelten Gütefunktion eine Optimierung durchgeführt. Die komplexen Zusammenhänge zwischen den Einflussparametern zueinander sowie zwischen Ressourcen der Hauptprozesse und der Peripherie erfordern eine simulationsgestützte Optimierung. Hierbei wird auf die in Kapitel 5.6 erarbeitete Softwareumsetzung zurückgegriffen. Dadurch wird eine Möglichkeit zur Verfügung gestellt, die Produktion gemäß den Vorgaben aus dem Arbeitsplan zu parametrieren sowie eine konkrete Auftragslast oder einen einzelnen Auftrag bezüglich des Energieprofils zu simulieren und zu bewerten. Aus dem entwickelten Kennzahlensystem, welches mit dem Simulationsmodell gekoppelt ist, wird die Gütefunktion generiert (vgl. Formel 5-12). Sie dient der multi-kriteriellen Bewertung der Szenarien. Unterschiedliche Parameterkonstellationen führen zu unterschiedlichen Ergebnissen der Gütefunktion.

In Abhängigkeit des Optimierungsziels können einzelne Parameter aus dem Arbeitsplan oder der Operationsplanung selektiert werden, die in einem zu definierenden Intervall variiert werden können. Diese Parametervariation ermöglicht es, den besten Parametervektor unter Betrachtung der zuvor definierten Gütefunktion zu bestimmen. Durch eine Anpassung der Gütefunktion mittels Gewichtungsfaktoren kann zudem die Zusammensetzung der zu optimierenden Zielgrößen variiert werden.

Somit können bereits während der Arbeitsplanerstellung oder Operationsplanung die Auswirkungen einer getroffenen Entscheidung (wie z.B. der Auswahl einer speziellen Ressource oder die Wahl einer Operationsfolge / Fertigungsstrategie) auf das spätere energetische Verhalten der Produktion hin untersucht und falls erforderlich optimiert werden. Außerdem wird es möglich, verschiedene, alternative Parametersätze zu testen und konkurrierende Zielgrößen in die energetische Optimierung mit einzubeziehen. Zusätzlich ist es durchführbar, die Modelle mit Erfahrungsdaten (z.B. Verfügbarkeiten, Abweichungen zu den Daten des Arbeitsplans) zu parametrieren. Somit ergibt sich der in Abbildung 5-27 dargestellte Regelkreis zur energetischen Optimierung der Produktion im Rahmen der Arbeitsplanung.

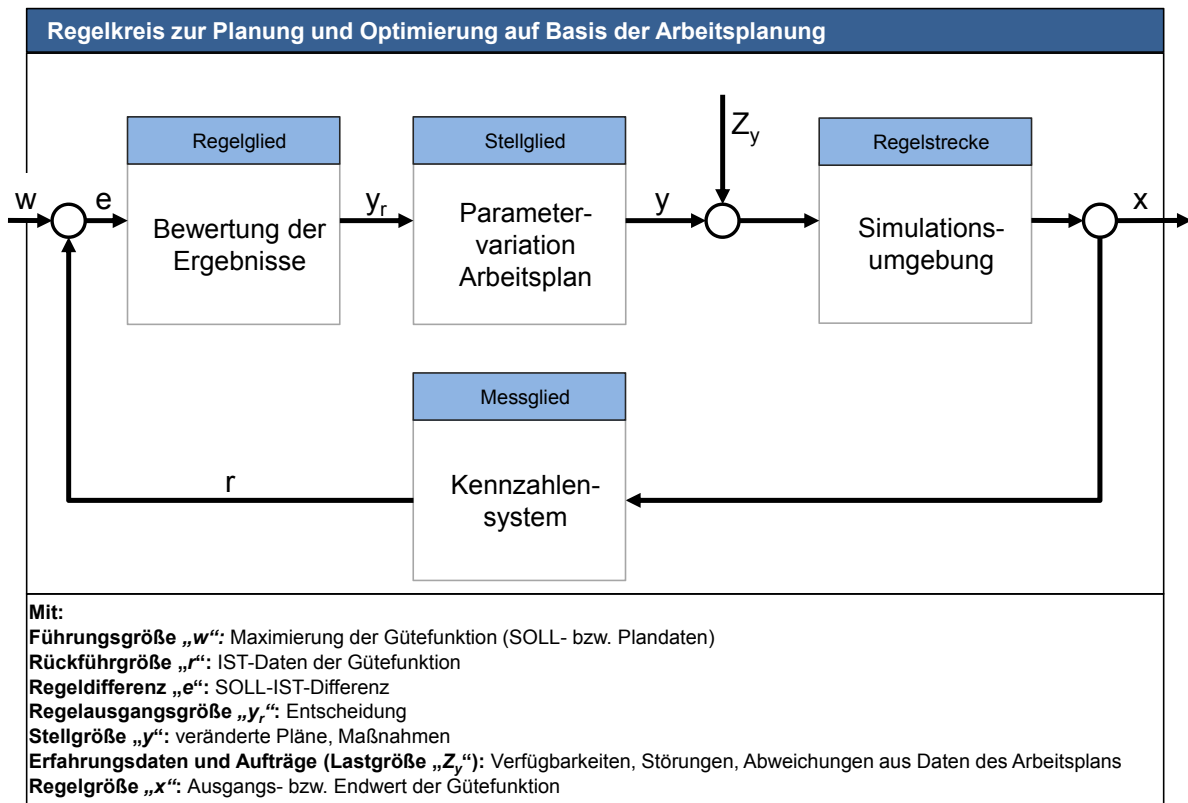


Abbildung 5-27: Optimierung in der Arbeitsplanung / Planungskreis

5.7.2 Optimierung in der Arbeitssteuerung / Steuerungskreis

Die Optimierung im Rahmen des Auftragsmanagements verfolgt das Ziel, alle beteiligten Ressourcen permanent in einem energetisch bestmöglichen Status zu betreiben.

Hierbei ist die zustandsoptimale Ansteuerung sämtlicher beteiligter Ressourcen als der zentrale Optimierungspunkt anzusehen. Da die Ressourcen in verschiedenen Zuständen ein individuelles Energieprofil aufweisen, ist es naheliegend, genau den Zustand auszuwählen, der sowohl umsetzbar ist als auch das niedrigste Energieprofil aufweist.

Außerdem können z.B. energetische Einsparpotentiale durch eine Anpassung der Flusssteuerung in der laufenden Produktion simuliert, bewertet und realisiert werden.

Die Reduktion von energieverbrauchenden Wartezeiten der Ressourcen der Hauptprozesse sowie die bedarfsorientierte Bereitstellung der Medien durch die peripheren Systeme kann mit der beschriebenen Messaging-Funktionalität erreicht werden (vgl. Kapitel 5.4).

Auch eine situationsbasierte Anpassung der Zustände beim Auftreten von Störungen ist möglich. Der konkrete Kommunikationsablauf beim Auftreten eines Ereignisses (z.B. Störung) läuft nach dem folgenden Schema ab (vgl. Abbildung 5-28):

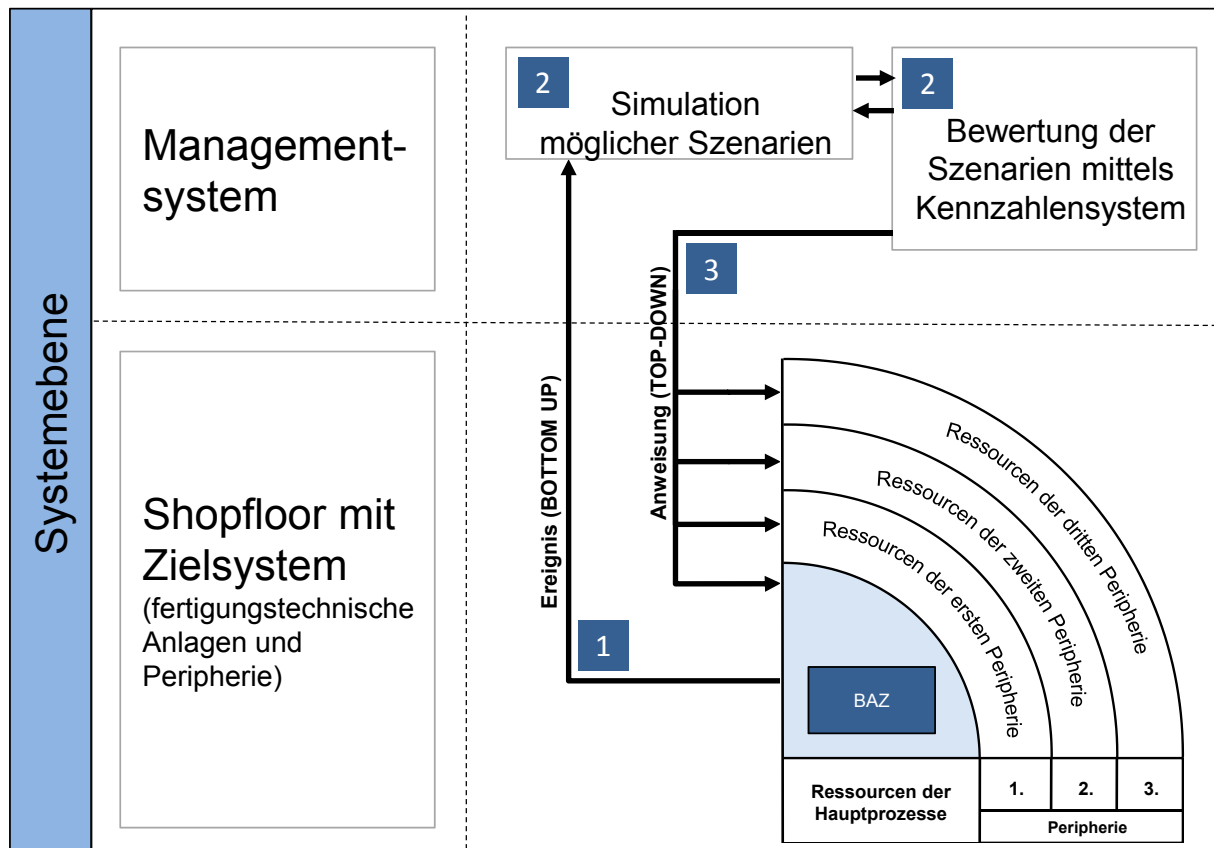


Abbildung 5-28: Optimierung in der Arbeitssteuerung / Steuerungskreis

1. Die Ressource, an der ein Ereignis (z.B. Fehler, vgl. Tabelle 5-6) auftritt, schickt (automatisiert oder über den Maschinenbediener/Instandhaltungsverantwortlichen) eine Bottom-up Nachricht an das übergeordnete Managementsystem.
2. Das Managementsystem, das als zentraler Datenhub fungiert, gibt alle relevanten Daten (u.a. Zustände der Ressourcen der Hauptprozesse und Peripherie, Auftragsstatus, geplante Aufträge, Fristigkeit, Schichtsystem, Instandhaltungspläne) an die Simulationsumgebung weiter. In der Simulationsumgebung können verschiedene Szenarien durchgespielt und über das entwickelte Kennzahlensystem (vgl. Kapitel 5.5) durch zuvor festgelegte Kriterien bewertet werden.
3. Auf dieser Basis werden über das Managementsystem top-down Nachrichten versendet, die alle beteiligten Systeme in den energetisch optimalen Zustand (z.B. Warten, Standby oder Ausschalten) versetzen.

Als entscheidende Punkte stellen sich die Interpretation der Nachrichten und die anschließende Beurteilung der Auswirkungen auf die Produktion dar. Hierbei ist auf eine durchgängige Verknüpfung mit den Zuständen der Ressourcen zu achten (vgl. Kapitel 5.2).

Der Nutzen des Messaging-Systems liegt somit in der Ebenen übergreifenden Ableitung von Maßnahmen, um damit einen energieeffizienten Betrieb von Produktionsanlagen zu ermöglichen. Es übernimmt die Kommunikation zwischen den einzelnen Ressourcen und dem Managementsystem und sorgt somit für einen durchgängigen Datenaustausch.

Das führt dazu, dass die Anlagen permanent in der Nähe des energetisch optimalen Betriebspunkt es arbeiten können.

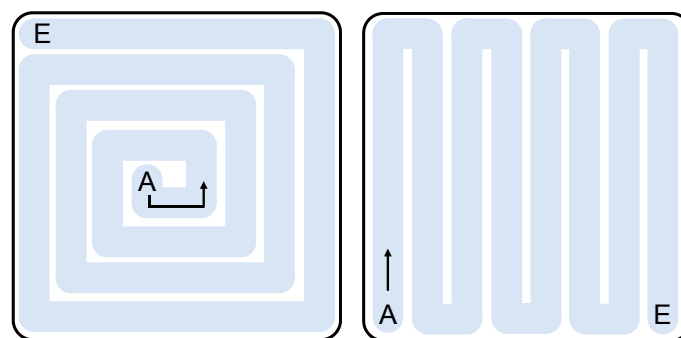
6 Validierung der Methodik am Beispiel der spanenden Fertigung

6.1 Definition eines Anwendungsszenarios und Adaption der Methodik

Die Validierung der entwickelten Methodik erfolgt am Beispiel eines Szenarios, welches im Rahmen der Arbeiten in der DFG Forschergruppe FOR 1088 „ECOMATION“ entwickelt wurde (vgl. Kapitel 3).

Die erforderliche Modellierung und Simulation wird mit dem Softwarewerkzeug Plant Simulation 10 der Siemens AG (vgl. Kapitel 5.6) durchgeführt.

Um den Einfluss von variablen Parametern aus der Arbeitsplanerstellung und der Operationsplanung ermitteln zu können, wird im Folgenden die Fertigung eines Referenzbauteils untersucht, welches durch die zwei verschiedenen Fertigungsstrategien „Abzeilen“ und „Zirkularfräsen“ gefertigt wird (vgl. Abbildung 6-1). Außerdem werden zwei Produkte hergestellt, die nachfolgend mit Produkt 1 „Kreistasche“ und Produkt 2 „Rechtecktasche“ bezeichnet werden (vgl. Abbildung 6-2).



A: Start der Bearbeitung
E: Ende Start der Bearbeitung

Abbildung 6-1: Fertigungsstrategien „zirkular“ (links) und „abzeilen“ (rechts) für Produkt 1 „Rechtecktasche“ (schematische Darstellung)

Jede Fertigungsstrategie besteht aus 2 Operationen: Es wird jeweils eine Schrupp- und eine Schlicht-Operation durchgeführt. Zwischen den beiden Operationen findet ein Rüstvorgang (Werkzeugwechsel) mit einer Dauer von 30 Sekunden statt. Ohne Produktwechsel dauert ein Werkstückwechsel 60 Sekunden, bei einem Produktwechsel (von P1 auf P2 oder umgekehrt) dagegen nimmt

die gesamte Rüstzeit 205 Sekunden in Anspruch (inkl. Einmessen des Werkstücknullpunktes). Das Referenzbauteil wird aus Aluminium (AlMg4,5Mn) gefertigt. Die Abmessungen können Abbildung 6-2 entnommen werden.

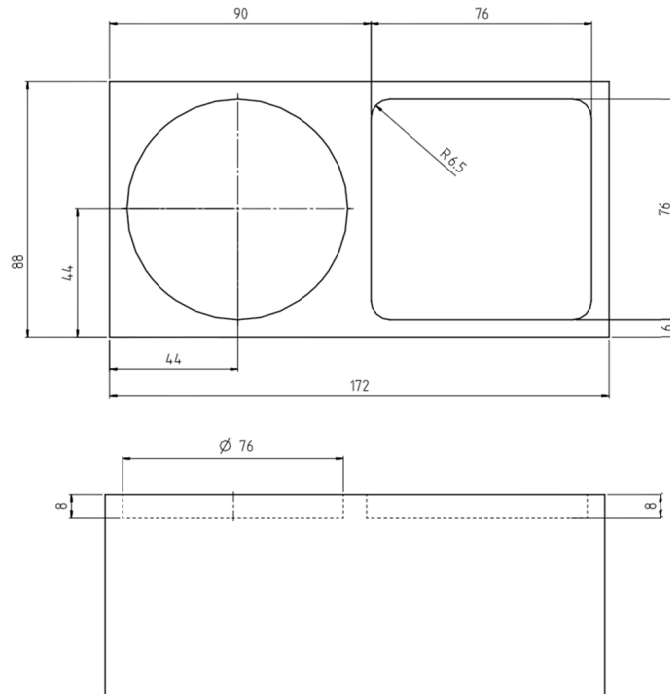


Abbildung 6-2: Maße der zu fräsenden Taschen am Referenzbauteil

Als organisatorische Parameter werden die den Bearbeitungszentren vor- und nachgelagerten Puffer, sowie die Flusststeuerung variiert (vgl. Abbildung 6-4).

Außerdem werden verschiedene Strategien der Auftragsabarbeitung auf ihren Einfluss auf die Energie hin getestet. Bei der ersten Strategie werden viele kleine Aufträge direkt abgearbeitet, bei der zweiten Strategie werden die Aufträge gesammelt und alle zwei Stunden blockweise bearbeitet. Die dritte Strategie umfasst die vollständig blockweise Abarbeitung aller Aufträge. Der Produktmix besteht aus den zwei verschiedenen Produkten, die sich durch unterschiedlich lange Bearbeitungszeiten unterscheiden. Die Produktion wird sowohl unter Vollauslastung als auch in einem Teillastbereich betrieben, bei dem die Fertigungsressourcen nicht über die gesamte Schichtdauer vollständig ausgelastet werden. Abbildung 6-4 fasst die variablen Parameter zusammen.

Beim fest gewählten Zweischichtsystem beginnt die Produktion um 6 Uhr und endet um 23 Uhr. Pausenzeiten werden von 9.30 bis 9.45 Uhr, von 12.15 bis 13 Uhr und von 19.30 bis 20 Uhr angenommen. (vgl. Abbildung 6-3).

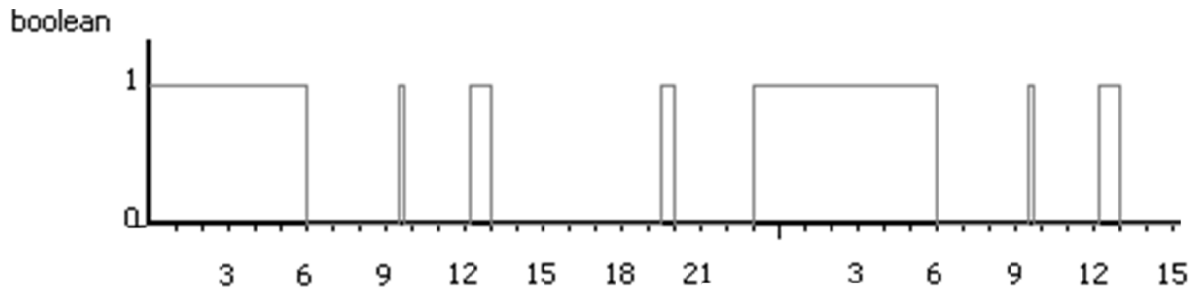


Abbildung 6-3: hinterlegtes Schichtsystem (0 = Arbeitszeit)

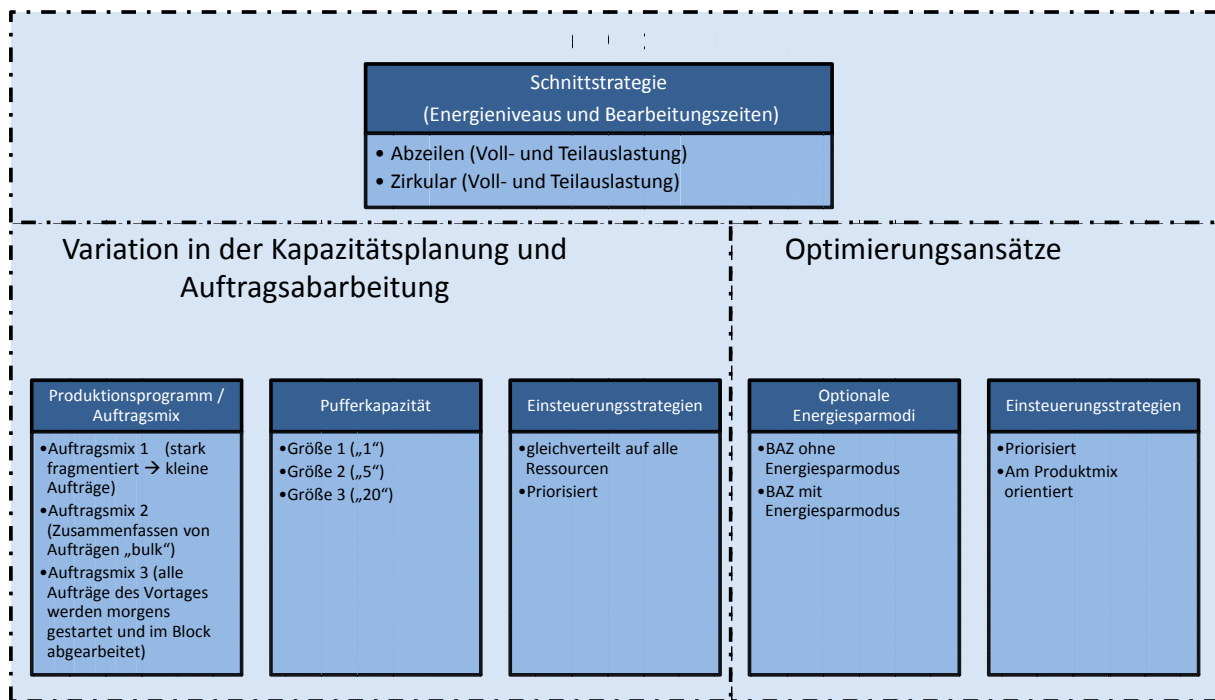


Abbildung 6-4: Variationen zur energetischen Optimierung

Betrachtete Ressourcen:

Als Ressourcen der Hauptprozesse werden fünf gleiche Bearbeitungszentren vom Typ Exeron DIGMA HSC 600/5 eingesetzt. Es handelt sich hierbei um HSC Maschinen, bei denen durch den Einsatz einer Minimalmengenschmierung auf das KSS-System verzichtet werden kann. Jedes BAZ bezieht seine Teile aus einem vorgelagerten Puffer und gibt die bearbeiteten Werkstücke an einen nachgelagerten Puffer ab.

Als periphere Systeme werden das Druckluftsystem der zweiten peripheren Ordnung sowie das HLK-System und das Beleuchtungssystem der dritten peripheren Ordnung berücksichtigt.



Abbildung 6-5: Exeron DIGMA HSC 600 (Bildquelle: www.exeron.de)

Außerdem wird im Fall der betrachteten BAZ die Spindelkühlung als peripheres System der ersten Ordnung modelliert, da diese außerhalb der Maschine in einem separaten Kühler durchgeführt wird. Sowohl für die Bearbeitungszentren als auch für die berücksichtigten peripheren Systeme werden spezifische Zustände definiert, welche von den Ressourcen eingenommen werden können.

Um eine Prozesskette abbilden zu können, werden jeweils ein der spanenden Bearbeitung vor- und ein nachgelagerter Prozess als Blackbox modelliert. Diese Prozesse werden nicht energetisch bewertet und dienen lediglich dazu, sich ergebende Varianzen im Materialfluss zu modellieren.

6.2 Modellierung der Ressourcen

Die Modellierung der betrachteten Ressourcen erfolgt auf Basis der in Kapitel 5 entwickelten Methodik. Im folgenden Abschnitt werden die gewählten Ressourcen und deren Zustände näher beschrieben:

6.2.1 Partialsysteme der Hauptprozesse

Die genannten Bearbeitungszentren vom Typ DIGMA HSC 600/5 werden jeweils mit vor- und nachgelagertem Puffer abgebildet, welche variabel sind und mit einer beliebigen Kapazität parame-

triert werden können. Die Maschinenbelegung erfolgt über eine Flusssteuerung, welche die Teile nach verschiedenen Strategien auf die BAZ verteilt (vgl. Abbildung 6-4)

Auf jedem Bearbeitungszentrum werden die beiden Produkte P1 und P2 vollständig in zwei Arbeitsgängen gefertigt. Es handelt sich somit um eine Komplettbearbeitung. Jeder Arbeitsgang hat eine individuelle Bearbeitungszeit.

Die Verfügbarkeit der Bearbeitungszentren liegt konstant bei jeweils 100%.

Als Zustände werden

- „WORK“,
- „WAIT“,
- „BLOCK“,
- „SETUP“ mit Werkzeugwechsel
- „SETUP“ ohne Werkzeugwechsel und
- „STANDBY“

modelliert (vgl. Kapitel 5.2).

Durch die zwei verschiedenen Arbeitsgänge, wird der Zustand „WORK“ nochmal in

- „WORK1“ und
- „WORK2“

unterteilt, von denen jeder ein individuelles Energieniveau aufweist (vgl. Abbildung 6-6). Im Rahmen der Auftragsdurchsetzung wird zusätzlich ein Energiesparmodus „SAVE“ eingeführt.

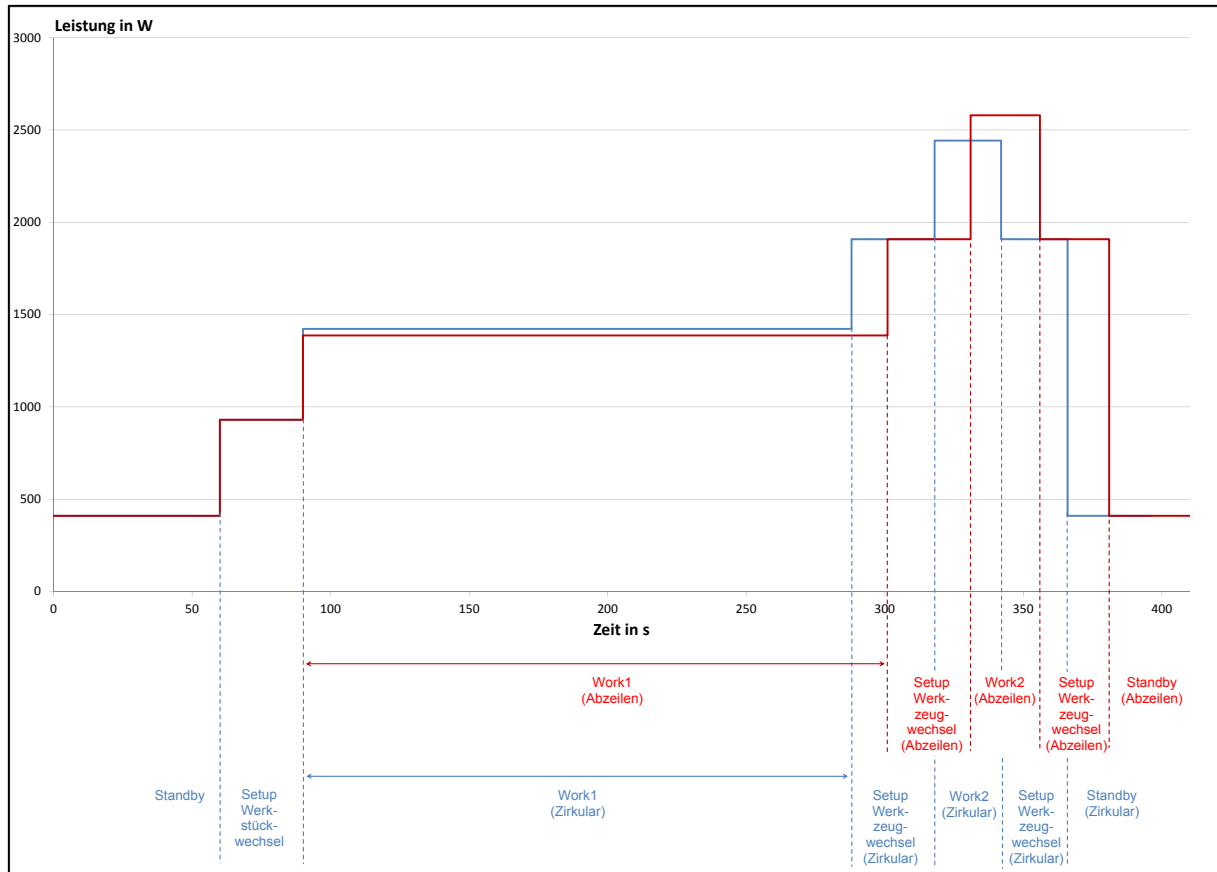


Abbildung 6-6: Beispielhafte Modellierung der Zustände (Kreistasche (zirkular und abzeilen))

6.2.2 Partialsysteme der Peripherie

Auch die peripheren Systeme werden gemäß den Ausführungen in Kapitel 5.2. modelliert. Im konkreten Anwendungsfall wird die Peripherie an das gewählte Szenario angepasst und folgende Festlegungen getroffen:

Spindelkühlung:

Die Spindelkühlung ist für die Kühlung der Achsen sowie für die Hauptspindel zuständig. Die Regelung erfolgt temperaturgesteuert. Es werden die Zustände

- „WORK (Umwälzpumpe)“ und
- „WORK (Kompressor)“

modelliert. Um die Temperaturabhängigkeit abbilden zu können, werden Felddaten aus durchgeführten Versuchsreihen verwendet. Diese haben ergeben, dass der Kompressor der Spindelkühlung alle 440 Sekunden einschaltet und 217 Sekunden läuft, um das Temperaturniveau von 22,5° C auf 19,5° C zu senken (vgl. Abbildung 6-7). Es konnte kein erhöhter Kühlbedarf während der Bearbei-

tungszeit festgestellt werden, da die Spindel bei der Fertigung des Referenzbauteils thermisch nicht mehrbelastet wird. Im vorliegenden Szenario wird die Spindelkühlung folglich mit den konstanten Intervallen modelliert, sobald der Hauptschalter der Maschine an ist.

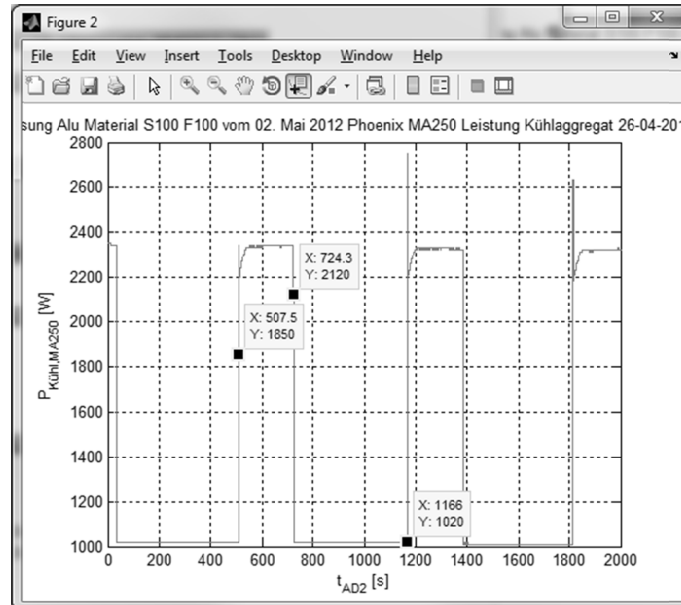


Abbildung 6-7: Messwerte der Spindelkühlung (Bildquelle: ISW, Universität Stuttgart)

Druckluftsystem:

Das Druckluftsystem wird als Einkompressorensystem modelliert. Es besteht aus Kolbenverdichter, einem Entfeuchter und Druckluft-Speicherkessel.

Eine Druckluftentnahme erfolgt nur im Zustand „WORK“ der Bearbeitungsmaschinen. Pro Bearbeitungszentrum werden im Durchschnitt 240 Liter/min entnommen. Zusätzlich wird von einem konstanten Leckageverlust von 50 Liter/min. für das gesamte Druckluftsystem ausgegangen, welcher permanent anliegt.

Der Verdichter arbeitet, sobald der Druck im Speicherkessel unter einen Minimaldruck von 8,5 Bar fällt. In diesem Fall wird der Kessel wieder bis zum Soll-Druck von 10,5 Bar aufgefüllt.

Der Entfeuchter läuft permanent und dient der Reduzierung des Wasseranteils in der komprimierten Luft. Das bedeutet, das Druckluftsystem kann sich im Zustand

- „WORK“ oder
- „STANDBY (Entfeuchter)“

befinden. Angaben zur Leistungsaufnahme basieren auf Messreihen, die für die Validierung im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden.

HLK-System:

Das HLK-System wird als konstanter Verbraucher während der Schichtzeit abgebildet, bei dem nur die Belüftungsanlage als elektrischer Verbraucher berücksichtigt wird. Dabei wird nicht zwischen Zuluft- und Abluftventilation unterschieden. Die Bestimmung der Leistungsaufnahme erfolgt auf Basis der Luftwechselrate, des Raumvolumens und des Wirkungsgrades der Ventilatoren.

Die gewählten Zustände sind

- „WORK“ und
- „STANDBY/OFF“

Diese Betrachtung führt dazu, dass im gewählten Anwendungsszenario das HLK-System in die dritte periphere Ordnung eingeteilt werden kann (vgl. Kapitel 2).

Beleuchtungssystem:

Das Beleuchtungssystem wird basierend auf dem gewählten Schichtplan modelliert. Zusätzlich wird eine der Arbeitsschicht vor- und nachgelagerte Zeit berücksichtigt, in der das Beleuchtungssystem in Betrieb ist. In der freien Zeit wird die Beleuchtung mit 20% als Notbeleuchtung betrieben. Die Bestimmung der Leistungsaufnahme basiert auf Dimensionierungsformeln für Beleuchtungssysteme (vgl. Kapitel 2). Das Beleuchtungssystem kann somit durch die Zustände

- „WORK“ und
- „WORK (Teillast 1)“

modelliert werden.

6.3 Gesamtmodell und prototypische Softwareumsetzung

Die oben genannten Teilsysteme werden miteinander in Bezug gesetzt und zu einem Gesamtsystem zusammengeführt. Aus den beschriebenen Ressourcen, sowie Randbedingungen und Materialflüssen ergibt sich das in Abbildung 6-8 dargestellte Szenario.

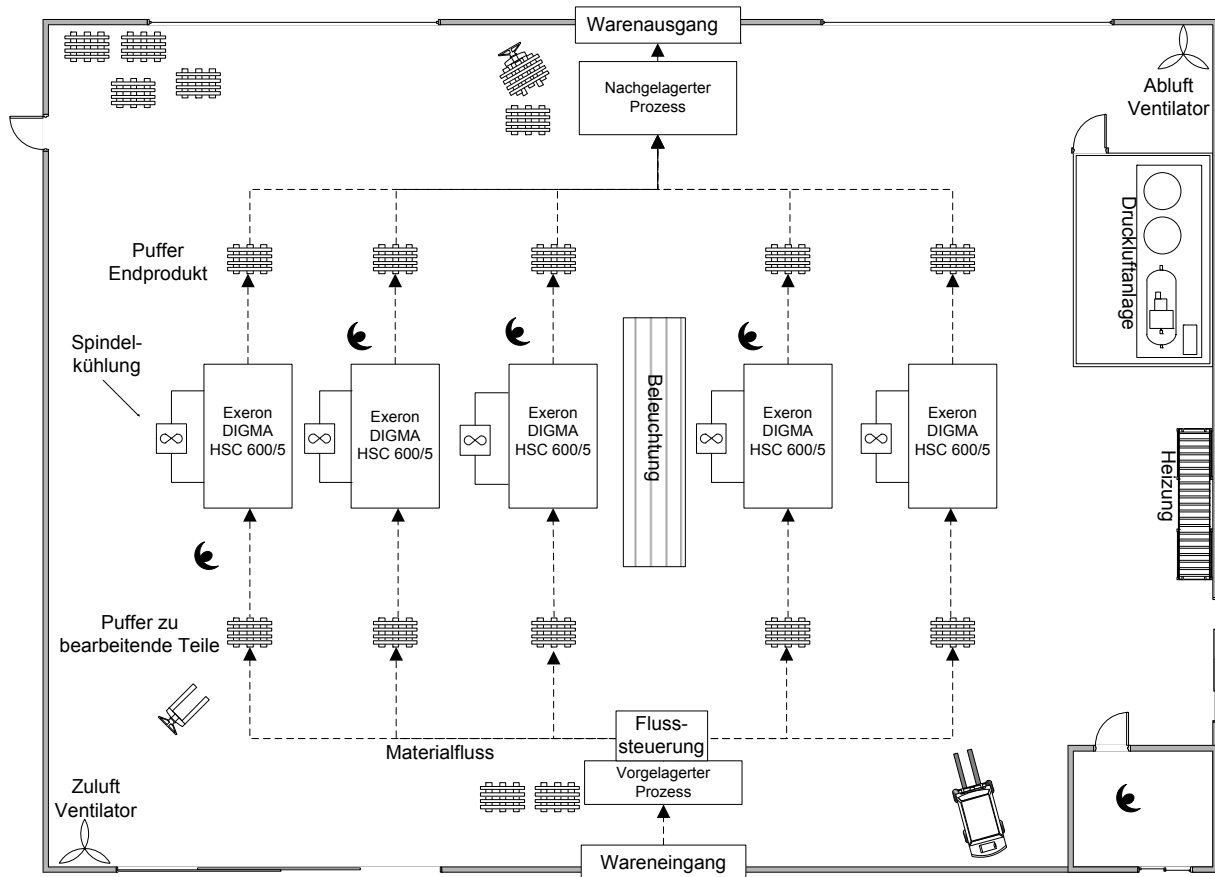



Abbildung 6-8: gewähltes Produktionsszenario

Die Softwareumsetzung des Szenarios erfolgt in Siemens Plant Simulation (vgl. Kapitel 5.6). Die Parametervariation und die Szenarioanalyse werden über eine Schnittstelle zu Microsoft Excel umgesetzt. In Excel können alternative Produktionsprogramme, Energieniveaus, Arbeitspläne und Pufferdimensionierungen hinterlegt werden, außerdem können die erforderlichen Parametrierungen der Ressourcen der Hauptprozesse sowie die der Peripherie durchgeführt werden. Auch die kennzahlenbasierte Auswertung durch die Gütefunktion erfolgt in Excel (vgl. Abbildung 6-9).



Energie-Cockpit

Universität **Stuttgart** **if**

Institut für Industrielle
Fertigung und Fabrikbetrieb

24h-Schicht wurde aktiviert

Simulationszeit	0
Aktuelle Leistung [kW]	0
Energieverbrauch [kWh]:	0.00
Gutteile [Stk.]	0

8h-Schicht aktivieren

Simulation starten

16h-Schicht aktivieren

Simulation stoppen

24h-Schicht aktivieren

Reset & Initialisieren

Produkt1	
	Bearbeitungsschritt 1
Rüstzeit [s]	0
Bearbeitungszeit [s]	60
Erholzeit [s]	0
Materialkosten [EUR]	1.5
Einheiten je qm [Stk./qm]	10
t_{gepl} [s]	60
Produkt2	
	Bearbeitungsschritt 1
Rüstzeit [s]	0
Bearbeitungszeit [s]	80
Erholzeit [s]	0
Materialkosten [EUR]	1.8
Einheiten je qm [Stk./qm]	10
t_{gepl} [s]	80
Pufferkapazitäten	
Puffer vor BAZ1	1
Puffer vor BAZ2	1
Puffer vor BAZ3	1
Puffer vor BAZ4	1
Puffer vor BAZ5	1
Puffer nach BAZ1	1
Puffer nach BAZ2	1
Puffer nach BAZ3	1
Puffer nach BAZ4	1
Puffer nach BAZ5	1
Zwischenlager	5

Arbeitsplan nach REFA AI - Werkstoff					
Auftragsangaben				Auftragsmenge	
Erzeugnis	Gruppe	Teil	Abnahmevorschrift		
Sachnummer	Teilfamilie	Bezeichnung des Arbeitsgegenstand	Welle AIMg3		
Sachnummer	Materialfamilie	Bezeichnung des Ausgangsmaterials	Aluminium 40 x 190		
Teil	Materialbezugshinweis				
Vorg. Nr.	Vorgangsbeschreibung				
	Vorgangsfamilie	Arbeitsplatz/ Betriebsmittel	Werkz.,Vorricht. Hilfsmittel	Ü	SP
10 Fräsen - Umfangsfräsen (Schruppen)					
1	BAZ	Garant Walzenfräser 45°			
20 Fräsen - Umfangsfräsen (Schlichten)					
2	BAZ	Garant Walzenfräser 45°			
30 Fräsen Schruppen Vollnut					
3	BAZ	Garant Schafffräser VHM			
40 Fräsen Schlichten Kontur					
4	BAZ	Garant Schafffräser VHM			

Abbildung 6-9: Beispielhafte Parametrierung der Modelle über Arbeitspläne in MS Excel (Ausschnitt)

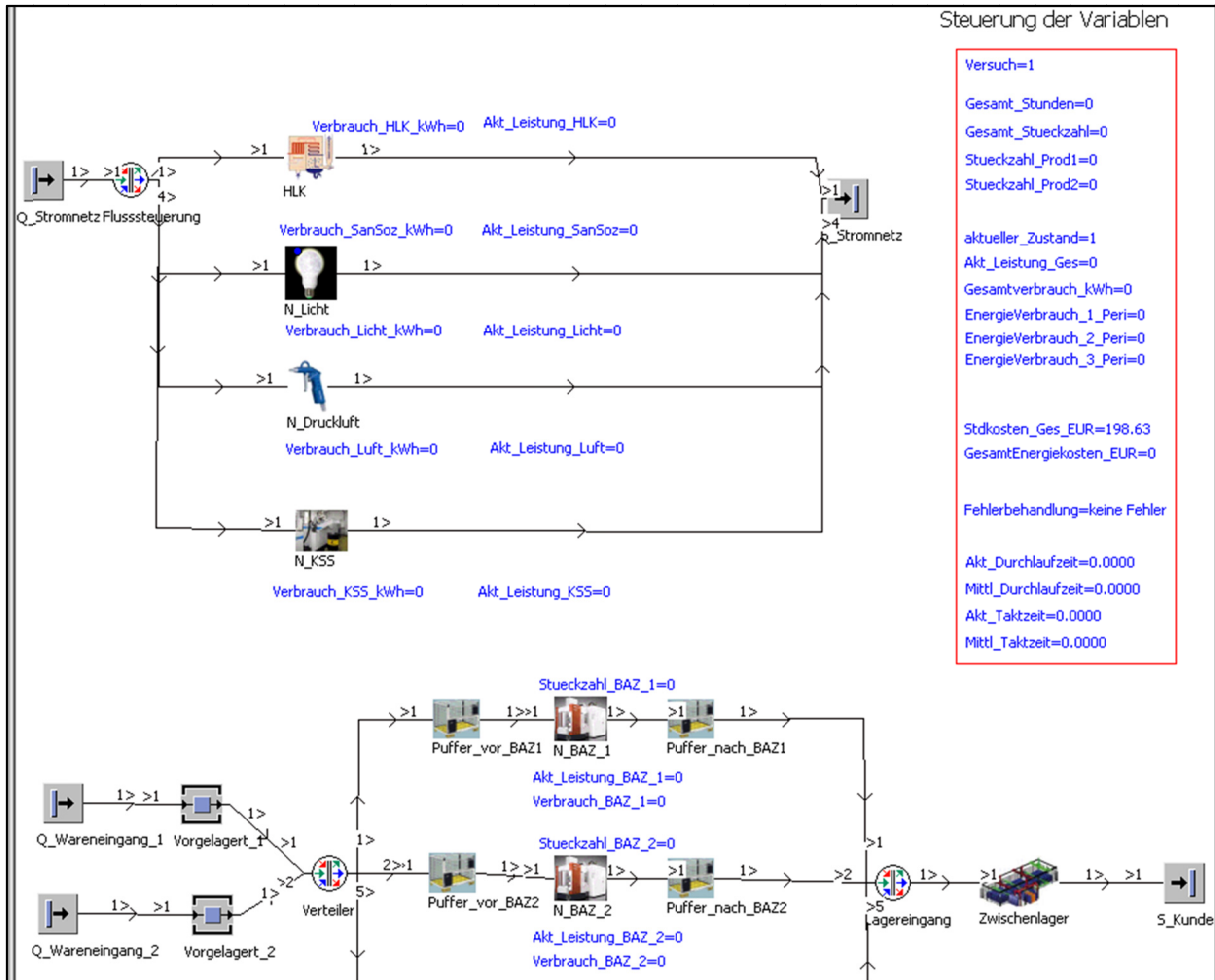


Abbildung 6-10: Beispielhafte Umsetzung der Modellierung in Plant Simulation 10 (Ausschnitt)

6.3.1 Kommunikation und Datenbereitstellung

Durch die entwickelte F-EIDL Funktionalität können im Modell verschiedene Datenrepräsentationen verwendet werden. Das hat den Vorteil, dass nicht zu jedem betrachteten System detaillierte Felddaten vorliegen müssen (vgl. Kapitel 5.2.5):

Die Grundleistungsaufnahme der Bearbeitungszentren P_{grund} sowie die Leistung des Luftschnittes P_{Leer} werden durch gemessene Felddaten hinterlegt. Die Prozessleistung P_{Prozess} wird wahlweise durch Felddaten oder mit der Berechnungsformel nach *Victor* ermittelt.

Der Energieverbrauch der Drucklufteinrichtung wird durch die Betrachtung einer durch Messungen ermittelten Lastganglinie integriert.

Das Beleuchtungssystem wird durch die Berechnung der installierten Leistung hinterlegt. Die Zustände der Spindelkühlung werden durch Messreihen berücksichtigt.

Die Datenbereitstellung der Energiedaten für die Ressourcen der Hauptprozesse sowie der peripheren Systeme erfolgt über eine Datenbank, in der die anliegenden Status der Ressourcen sowie die aktuelle Leistungsaufnahme der zur Verfügung stehenden Ressourcen hinterlegt sind.

Durch die Auswahl der gewünschten Ressource, des Bauteils und der Operationsfolge werden die Modelle automatisiert über eine DDE-Schnittstelle parametrisiert (vgl. Kapitel 5.6).

Für jeweils 10 Sekunden simulierte Zeit werden die aktuellen Zustände und die aktuelle Leistungsaufnahme der peripheren Systeme sowie die der Ressourcen der Hauptprozesse über DDE von Plant Simulation in eine Ergebnis-Datenbank geschrieben. Pro simulierte 24 Stunden werden somit 8640 Datensätze mit je 20 Einzelwerten für die Auswertung erfasst. Die Inhalte der Datenbank bilden die Basis zur Berechnung des Energieverbrauchs sowie der Gütefunktion und ermöglichen das Generieren von Lastganglinien.

6.3.2 Simulation von unterschiedlichen Parametersätzen und Szenarien

Im Rahmen der Simulation werden die beiden grundlegenden Funktionalitäten der entwickelten Methodik validiert:

- Bewertung von Planungsalternativen aus Arbeitsplan und Operationsplanung („Planungskreis“)
- Bewertung im Rahmen der Kapazitätsplanung und des Auftragsmanagements („Steuerungskreis“)

6.3.2.1 Simulation von Planungsalternativen („Planungskreis“)

Auf Basis der oben getroffenen Annahmen können, ausgehend von einer Modellparametrierung in Excel, verschiedene Parametersätze simuliert werden. Jeder Parametersatz stellt eine Planungsalternative dar.

Konkret werden im Rahmen der Validierung des Planungskreises zwei verschiedene Schnittstrategien für zwei verschiedene Produkte unter Annahme von zwei gegebenen Auftragslasten bewertet (vgl. Abbildung 6-4).

Die Lastganglinie der Bearbeitungszentren für die Fertigung der Produkte ist exemplarisch der Abbildung 6-6 zu entnehmen.

Die Ergebnisse in Tabelle 6-1 zeigen, dass die Fertigungsstrategie „zirkular“ hinsichtlich des Energiebedarfs effizienter ist und dass die teilweise Auslastung der Ressourcen zu einem höheren Energiebedarf pro Teil führt, da Wartezeiten auf die kleinere Anzahl der produzierten Teile umgelegt

werden. Die Effizienz der Strategie „zirkular“ ist in der deutlich kürzeren Bearbeitungszeit im Gegensatz zur Strategie „Abzeilen“ begründet. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass nicht nur die geringeren Fertigungszeiten auf den BAZ für Einsparpotentiale sorgen, sondern auch das veränderte Verhalten der peripheren Systeme, insbesondere das des Druckluftsystems: Es ist zu erkennen, dass der Kompressor des Druckluftsystems bei beiden Bearbeitungsstrategien im Volllastfall einen vergleichbaren kumulierten Verbrauch aufweist. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass im gleichen Intervall von 30 Minuten 23 Teile bei der Strategie „zirkular“ gefertigt werden, beim Abzeilen hingegen nur 19 Teile (vgl. Abbildung 6-11).

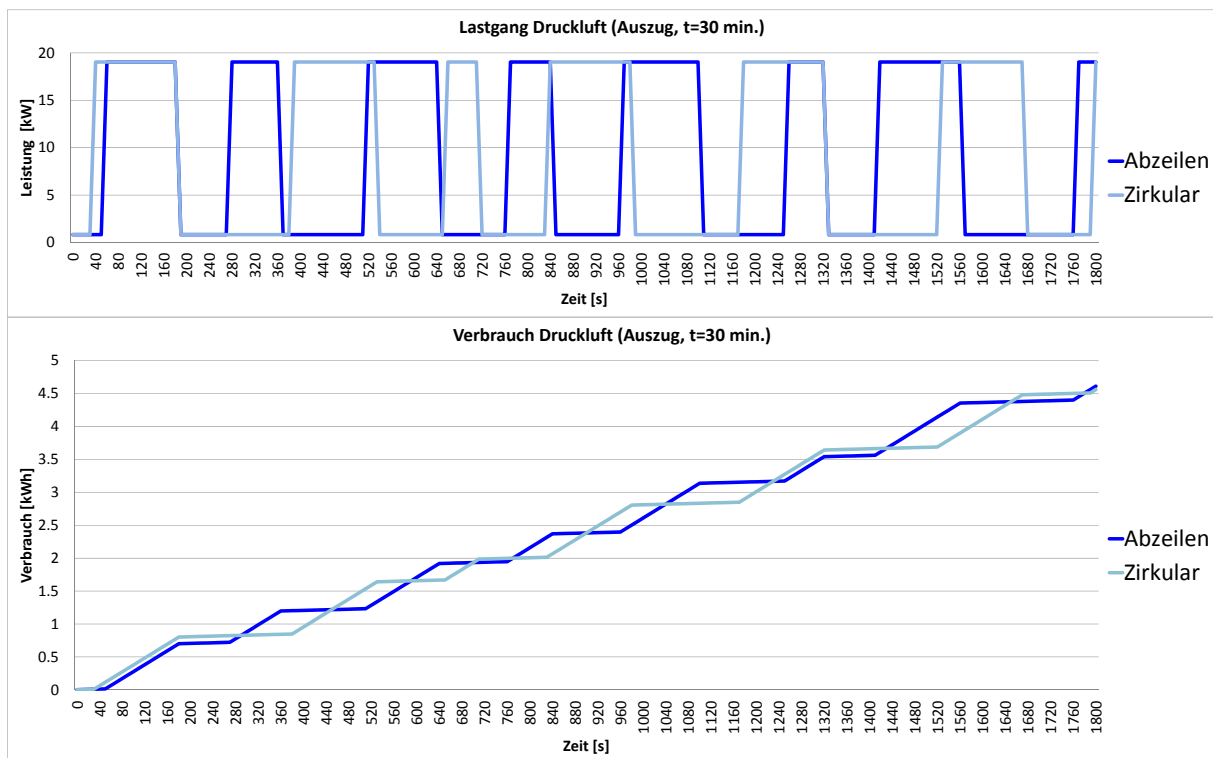


Abbildung 6-11: Lastganglinien des Druckluftsystems bei unterschiedlichen Fertigungsstrategien

Im Volllastfall, in dem die modellierten Ressourcen ständig mit Produkten versorgt werden, ist die Einsparung deutlich zu erkennen. Trotz einer höheren Ausbringung ist der absolute Gesamtverbrauch beim Zirkularfräsen geringer. Bezogen auf ein gefertigtes Teil sind erhebliche Einsparungen möglich.

Tabelle 6-1: Ergebnisse der Planungsvariablen (Angaben pro Arbeitstag)

Schnittstrategie	Lastfall	Gesamtsystem: Absolutverbrauch [kWh]	Laufzeit Druckluftsystem [min]	Gefertigte Teile P1	Gefertigte Teile P2	Energieverbrauch/Teil [kWh]	Energiekosten pro Teil ² in Euro
Zirkular	Teillast	556,50	236,83	300	100	1,3913	0,237
Abzeilen	Teillast	574,53	255,17	300	100	1,4363	0,244
Zirkular	Volllast	624,36	351,17	307	308	1,0152	0,173
Abzeilen	Volllast	631,94	373,0	290	290	1,0895	0,185

6.3.2.2 Simulation des Steuerungskreises

In einem zweiten Schritt werden mögliche Variationen auf das energetische Verhalten untersucht, die im Rahmen der Kapazitätsplanung auftreten können.

Hierfür werden drei verschiedene Zusammenstellungen der Auftragsabarbeitung sowie drei unterschiedliche Pufferdimensionierungen bewertet. Es ergeben sich folglich neun alternative Parametersätze (vgl. Abbildung 6-4).

In einem letzten Schritt werden die Auswirkungen auf das energetische Verhalten der Produktion beurteilt, wenn die nicht verwendeten Ressourcen in einen energetisch optimalen Status versetzt werden und eine Optimierung der Flusssteuerung erfolgt. Hierfür wird der Status „SAVE“ für die BAZ eingeführt, welcher den Zustand „STANDBY“ ersetzt. Der SAVE-Modus beschreibt das softwareseitige Abschalten der BAZ über z.B. das Messagingsystem, wenn keine Aufträge verfügbar und die Puffer leer sind. Zusätzlich werden die STANDBY-Zustände der Beleuchtung und der BAZ in den Freischichten auf „OFF“ gesetzt. Zudem wird eine belastungsorientierte Flusssteuerung eingeführt, welche die Einsteuerung der Aufträge auf die BAZ optimiert. Das Ziel ist die Vermeidung von Wartezeiten sowie von Rüstzeiten aufgrund von häufigen Produktwechseln auf den einzelnen Ressourcen.

² Annahme: Arbeitspreis 17 ct/kwh, keine Grundkosten

6.4 Bewertung der Energieeffizienz in der spanenden Fertigung

6.4.1 Bewertung auf Basis von Kennzahlen

Zur Bewertung des Planungs- und Steuerungsszenarios wird das in Kapitel 5.5 entwickelte Kennzahlensystem sowie die in Kapitel 5.7 verwendete Methode zur Bildung einer Gütefunktion verwendet.

Die Spitzenkennzahl „Effizienzgrad“ basiert auf einem Referenzwert, den es in einem ersten Schritt zu ermitteln gilt:

Der Referenzwert wird im Rahmen des Szenarios durch einen Simulationslauf über einen Tag (24h) mit einer Verfügbarkeit von 100% und einem Qualitätsgrad von 100% ermittelt. Zusätzlich werden Standby-Verbräuche minimiert und die Leckage des Druckluftsystems ignoriert. Außerdem wird ein Produktionsprogramm verwendet, mit dem die Ressourcen voll ausgelastet sind. Durch all die beschriebenen Faktoren dient der Referenzwert als geeignete Bezugsgröße für einen unternehmensinternen Bewertungs- und Verbesserungsprozess, nicht jedoch für ein unternehmensübergreifendes Benchmark. (vgl. Abschnitt 5.5.2)

Die Gewichtung der Bewertungskriterien der Gütefunktion erfolgt durch einen paarweisen Vergleich. Die folgende Abbildung stellt die gewählte Gewichtung dar, welche im Rahmen der Arbeiten in der Forschergruppe „ECOMATION“ festgelegt wurde (vgl. Abbildung 6-12).

Lfd. Nr.	Spezifische Gewichtungsfaktoren	Lfd. Nr.				Gewichtung G		Platz
		1	2	3	4	Pkt.	%	
1	A: energetischer Effizienzgrad		2	2	2	6	50%	1
2	B: OEE	0		0	2	2	17%	3
3	C: Durchlaufzeit	0	2		2	4	33%	2
4	D: Bestand im System	0	0	0		0	0%	4
Summe Punkte:						12	100%	
Punkteverteilung: 2 : 0 = 1. Kriterium wichtiger als 2. Kriterium 1 : 1 = 1. Kriterium gleich wichtig wie 2. Kriterium 0 : 2 = 1. Kriterium weniger wichtig wie 2. Kriterium								

Abbildung 6-12: Paarweiser Vergleich zur Ermittlung der Gewichtungskriterien im Szenario

Hiernach wird der energetische Effizienzgrad mit 50%, die Durchlaufzeit mit 33 %, die OEE mit 17 % und der Bestand im System mit 0 % und gewichtet.

Es ergibt sich folgende Gütefunktion (vgl. auch Kapitel 5.7):

$$\max z = \sum w_i k_i = (0,5 \times k_{EG}) + (0,17 \times k_{OEE}) + (0,33 \times k_{DLZ}) + (0 \times k_{Bestand}) \quad \text{Formel 6-1}$$

Die Simulationsläufe der verschiedenen Parameterkombinationen im Rahmen der Planung liefern, unter Berücksichtigung der gewählten Gütefunktion, die in Abbildung 6-13 dargestellten Ergebnisse:

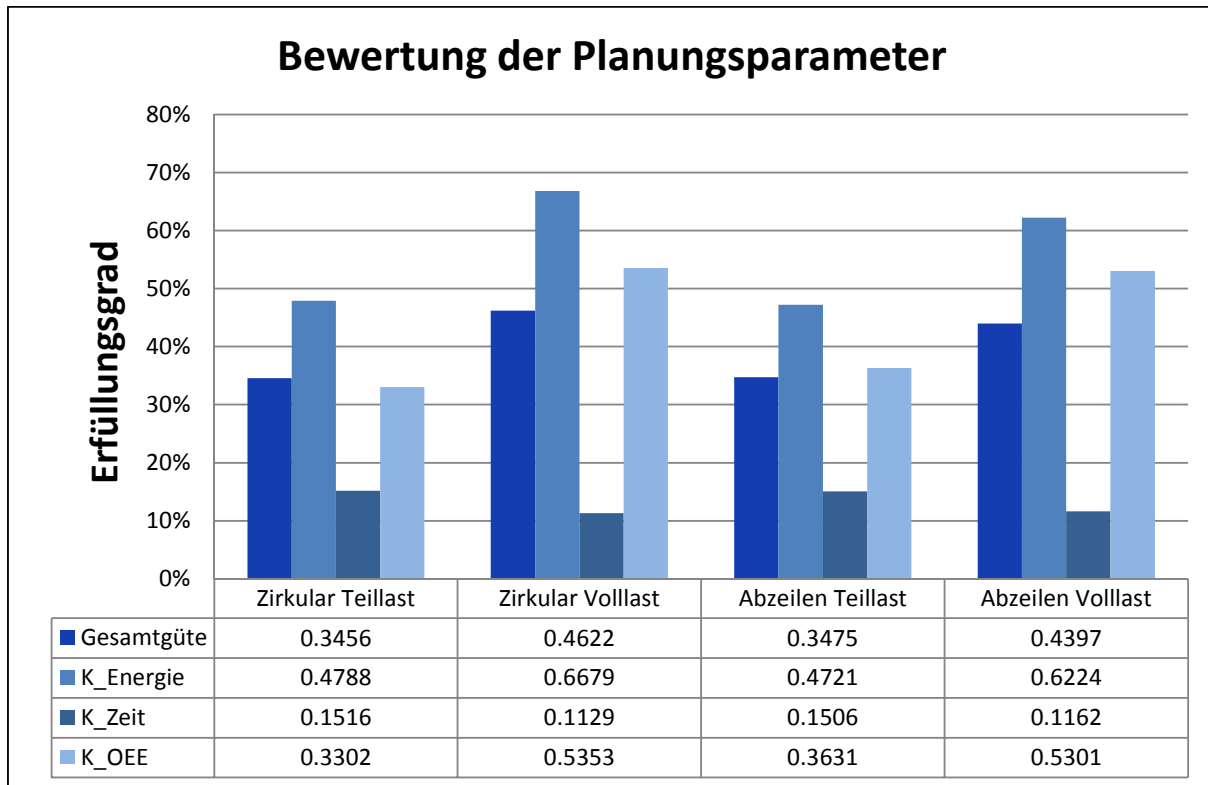


Abbildung 6-13: Bewertung der Planungsparameter

Es wird ersichtlich, dass das Szenario Zirkular/Volllast unter den gegebenen Randbedingungen zu einem Maximum der gewählten Gütefunktion führt und somit das bestmögliche Ergebnis darstellt. Sowohl das Kriterium der Energie als auch das der „OEE“ erreichen die höchsten Werte. Die geringen Werte des Kriteriums „Durchlaufzeit“ sind auf die Verwendung von großen Pufferkapazitäten zurückzuführen.

Im Teillastbereich ist die Bearbeitungsstrategie Abzeilen zu bevorzugen. Das ist insbesondere darin zu begründen, dass die OEE im Vergleich zur Strategie „Zirkular“ aufgrund des besseren Verhältnisses zwischen Bearbeitungszeit und Rüstzeit deutlich größer ist. Rein energetisch wäre die Strategie „Zirkular“ vorzuziehen.

Die Bewertung der Parametervariation im Steuerungskreis erfolgt durch die gleiche Gewichtung der Gütekriterien wie im Planungskreis.

Aus der rein energetischen Sicht kann festgestellt werden, dass zu kleine Puffer aufgrund der vielen Warte- und Blockierzeiten zu Ineffizienzen führen. Zu große Puffer erzeugen dagegen den Effekt, dass bei geringem Auftragsvolumen hohe Pufferbestände von einzelnen BAZ abgearbeitet werden, während die verbleibenden Ressourcen keine Teile mehr bekommen. Weiter ist festzustellen, dass eine priorisierte Auftragsvergabe zu deutlichen Einsparpotentialen führen kann. (vgl. Abbildung 6-14)

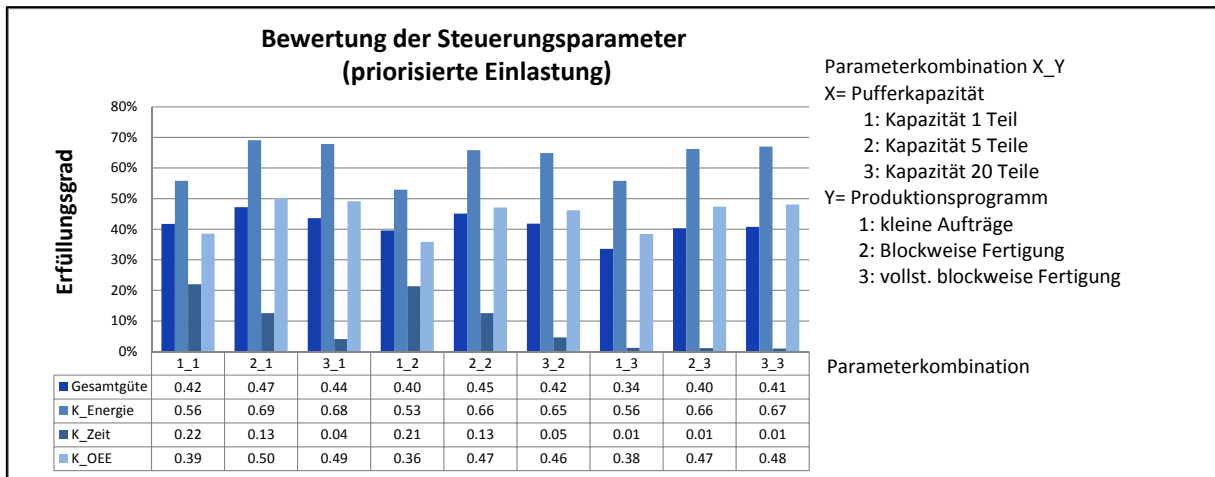


Abbildung 6-14: Einfluss verschiedener Puffer und Auftragsverteilungen (priorisiert)

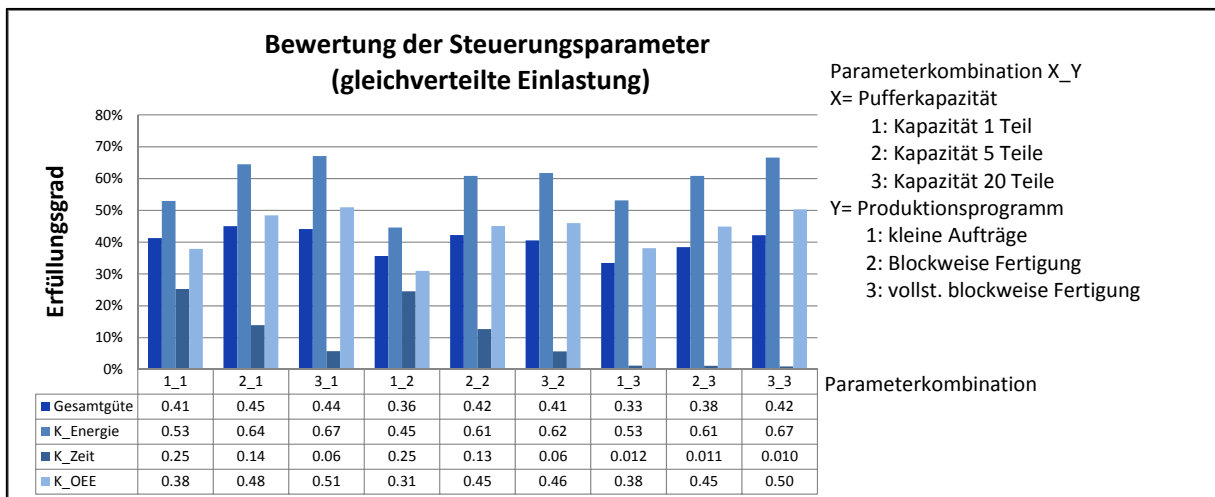


Abbildung 6-15: Einfluss verschiedener Puffer und Auftragsverteilungen (gleichverteilt)

Bei der multikriteriellen Bewertung wird deutlich, dass sich OEE und Energieeffizienz gegensätzlich zur Durchlaufzeit verhalten. Dies führt zu einem Optimierungsproblem, da die Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung und zur OEE-Steigerung (wie z.B. das Anlegen von Puffern) zu einer Erhöhung der Durchlaufzeit führen (vgl. Abbildung 6-16).

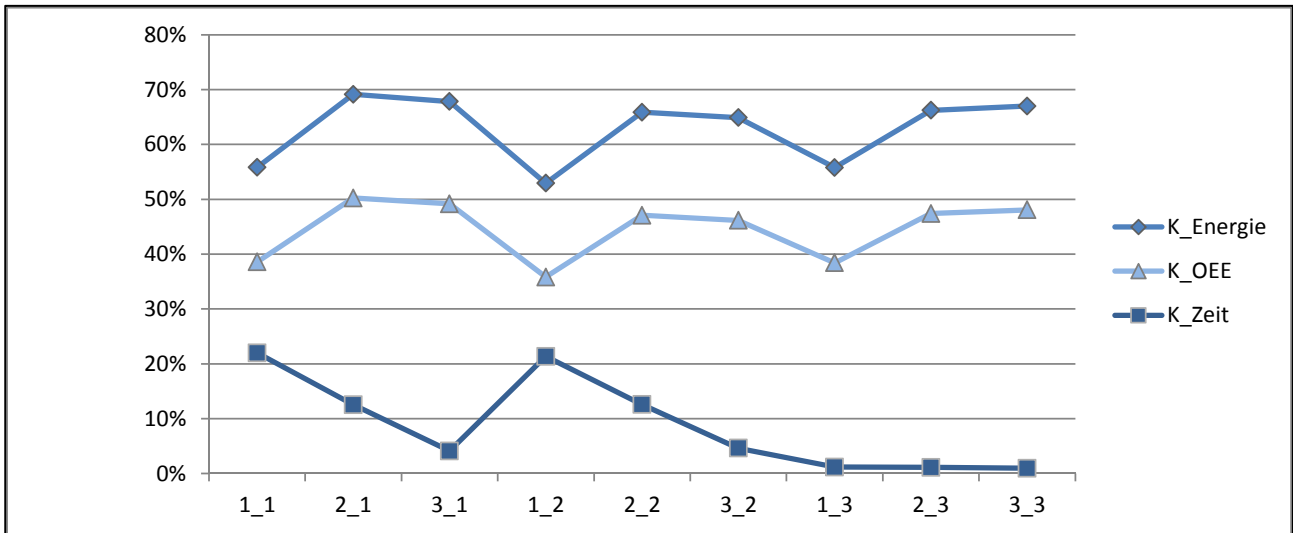


Abbildung 6-16: Korrelation der Gütekriterien

Mit der gewählten Gewichtung der Kriterien ergibt sich, unter Berücksichtigung des Produktionsprogramms ein Maximum der Gütefunktion beim Parametersatz „2_1“ (Pufferkapazität 5 Teile und sofortiges Abarbeiten der Aufträge bei priorisierter Einsteuerung (vgl. Abbildung 6-14)).

6.5 Ableitung von geeigneten Handlungsstrategien

Die Variation einzelner Parameter zeigt, dass diese unterschiedlich große Einflüsse auf das energetische Verhalten einer Produktion haben. Die Ergebnisse der Parametervariation in der Planung machen deutlich, dass in erster Linie der Faktor „Bearbeitungszeit der BAZ“ einen großen Einfluss auf den Energiebedarf hat. Dies ist darin begründet, dass in dieser Zeit auch die peripheren Systeme wie die Druckluftversorgung eine höhere Leistungsaufnahme haben.

Diese Erkenntnis führt dazu, dass im Rahmen des gewählten Szenarios die folgenden beiden konkreten Handlungsempfehlungen gegeben werden können:

- In den gewählten Planungsszenarien sind die Unterschiede der Leistungsaufnahme nur gering. Das ist in der geringen prozessspezifischen Leistungsaufnahme im Verhältnis zur Grundleistung der Ressource begründet. Daraus resultiert, dass die Strategie mit der geringeren Bearbeitungszeit im Allgemeinen zu bevorzugen ist.
- Im Rahmen der Kapazitätsplanung und Auftragsabarbeitung können sowohl durch eine geeignete Pufferdimensionierung als auch durch die Wahl einer geeigneten Flusssteuerung Einspareffekte erzielt werden. Warte- und Blockierzeiten der Maschinen sind unbedingt zu vermeiden, da der Energieverbrauch in diesem Zustand beträchtlich ist.

Die folgende Abbildung 6-17 zeigt die energetischen Einsparpotentiale bei der Umsetzung der Optimierungsansätze „belastungsorientierte Flusssteuerung“ und „Energiesparmodus“. (vgl. Kapitel 6.3.2)

Durch die Umsetzung dieser beiden Maßnahmen werden bei gleichbleibender OEE und Verbesserung der Durchlaufzeit energetische Einsparpotentiale in einer Produktion von über 10% erzielt. (vgl. Abbildung 6-17).

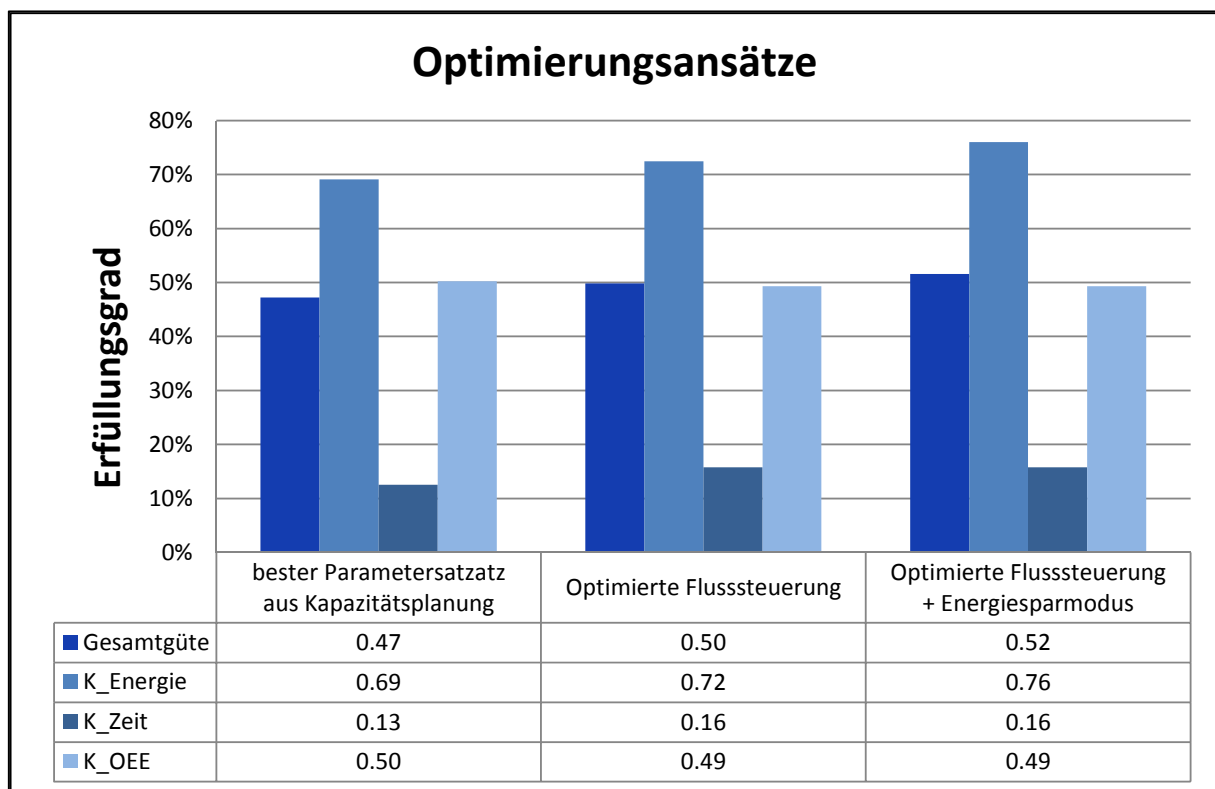


Abbildung 6-17: Optimierungsmöglichkeiten

6.6 Abschließende Bewertung der Methodik

Die Untersuchung verschiedener Parameterkonstellationen hinsichtlich des energetischen Verhaltens weist große Schwankungen auf, aus denen sich potentielle Einsparpotentiale ableiten lassen.

Bei der Optimierung im Rahmen des Planungskreises konnte gezeigt werden, dass die Fertigungsstrategie als technologischer Parameter den Energieverbrauch beeinflusst. Da im Szenario durch die Wahl des gefertigten Bauteils die BAZ nicht an ihren technologischen Grenzen betrieben wurden, kommt diese Tatsache nicht vollständig zum Tragen. Berücksichtigt man, dass pro Teil eine Zeitersparnis von über 15% durch die Wahl der Operationsfolge erzielbar ist (bei Produkt „Rechtecktasche“), ist insbesondere im Bereich der Großserienfertigung ein hohes Einsparpotential gegeben. Beim gewählten Referenzbauteil wurde deutlich, dass sich die Einsparpotentiale nahezu vollständig auf die Zeitersparnis einer Fertigungsstrategie zurückführen lassen. Die unterschiedlichen Energieniveaus der Bearbeitungsschritte können (bezogen auf das gefertigte Referenzbauteil) nahezu vernachlässigt werden. Das ist darauf zurückzuführen, dass die BAZ so betrieben wurden, dass der Prozessenergieverbrauch im Verhältnis zum gesamten Energieverbrauch sehr gering ist.

Durch eine geeignete Pufferdimensionierung im Rahmen der Planung können Warte- und Blockierzeiten verringert werden, was zu einem höheren energetischen Effizienzgrad und zu einer höheren OEE führt. Die großen Puffer sind trotzdem nicht bedingungslos zu empfehlen, da diese zu einer erheblichen Erhöhung der Durchlaufzeit und der Bestände im System führt. Um diese gegenläufigen Optimierungsgrößen einordnen zu können, muss der Planer eine Priorisierung derer durch die vorgestellte multikriterielle Gütefunktion vornehmen.

Im Rahmen der Arbeitssteuerung kann die Methodik dazu dienen, die gesamte Produktion energetisch zu optimieren. Diese Tatsache wurde anhand der Wahl von unterschiedlichen Einsteuerungsstrategien, der Vermeidung von Standby-Verlusten sowie der losweisen Bearbeitung von Aufträgen gezeigt. Auch hier gilt es zu berücksichtigen, dass ein Optimierungskonflikt zwischen dem energetischen Optimum, der Bildung von großen Beständen sowie der hohen Durchlaufzeit existiert.

Die Methodik eignet sich, um den Einfluss möglicher technologischer und organisatorischer Parameter auf das energetische Verhalten einer Produktion hin zu untersuchen sowie den bestmöglichen Parametersatz von vorgegebenen Alternativen zu bestimmen. Sie ist jedoch nicht in der Lage, ein Optimum dieser Parameter zu ermitteln. Hierfür sind weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich. Weiterhin wurde nur eine begrenzte Anzahl von Variationsparametern gewählt. Durch die auftretende „kombinatorische Explosion“ bei der Wahl weiterer Parameter wird der gewählte Ansatz auf-

grund der sehr langen Simulationszeit schwer handhabbar. Auch hier sind weitere Arbeiten erforderlich, um dieses Defizit zu beheben.

Im Auftragsmanagement kann die Methodik dazu verwendet werden, Teillastbereiche z.B. durch eine Optimierung der Flusssteuerung oder eine Anpassung der Pufferkapazität zu minimieren.

Abschließend kann festgehalten werden, dass sowohl organisatorische als auch technologische Parameter einen großen Einfluss auf das energetische Verhalten einer Produktion haben können. Die erarbeitete Methodik kann dabei unterstützen, die komplexen Zusammenhänge zwischen Energieverbrauch und den klassischen Zielgrößen der Produktion transparent darzustellen und zu verstehen sowie einen geeigneten Parametersatz bei der Vorgabe von Alternativen zu ermitteln.

Die Methodik hilft außerdem, dem Planer ein Werkzeug in die Hand zu geben, mit dem er die Konsequenzen einer Entscheidung auf das energetische Verhalten einer Produktion ermitteln kann.

Die Energie darf nicht isoliert betrachtet werden. Aus diesem Grund ist eine Gütefunktion erforderlich, die alternative Zielgrößen berücksichtigt.

Es kann festgestellt werden, dass auch ohne konstruktive Eingriffe das energetische Verhalten der Produktion durch eine explizite Berücksichtigung der Energie in der Planung und Steuerung wesentlich beeinflusst werden kann. Das hat zur Folge, dass in der Phase der Arbeitsplanung auch eine Optimierung hinsichtlich der Energieeffizienz vorgenommen werden kann.

Durch den modellbasierten Ansatz ist jedoch ein großer Aufwand bei der Modellerstellung erforderlich, der für die Fertigung von Kleinstserien oder kundenindividuellen Produkten in der erarbeiteten, prototypischen Form schwer umsetzbar ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Weltweit steigt die Nachfrage nach endlichen Ressourcen. Dies führt zu einer Verknappung und daraus resultierend zu einer Verteuerung dieser. Eine Steigerung der Ressourceneffizienz kann im Bereich der Produktion neben dem ökologischen Faktor auch ökonomisch sinnvoll sein. Um die Energieeffizienz in der Produktion steigern zu können, müssen die Zusammenhänge verstanden und die vorhandenen Stellgrößen identifiziert werden.

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war es, eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion zu erarbeiten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden neben dem Stand der Technik auch die relevanten Forschungsansätze umfassend auf die in der Problemstellung der Arbeit identifizierten Anforderungen hin untersucht. Es wurde deutlich, dass einige Teilaspekte bestehender Methoden wie z.B. die statusbasierte Modellierung auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden können.

Es folgte die Entwicklung einer Methodik, die auf einen modellbasierten Ansatz aufbaut. Durch die Modellierung auf Basis der Systemtechnik ist es möglich, eine Produktion hinreichend genau abzubilden. Hierbei wurden sowohl Bearbeitungszentren als auch die relevanten peripheren Systeme einer spanenden Fertigung statusbasiert modelliert und miteinander in Bezug gesetzt.

Durch die Einbindung der Arbeitsvorbereitung in die energetische Planung über die Verknüpfung von Arbeitsplan, Operationsplan und Modellen wurde eine Funktionalität zur Untersuchung von verschiedenen Parameterkonstellationen von möglichen Planungsalternativen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das spätere energetische Verhalten erarbeitet. Hiermit wurde die Möglichkeit geschaffen, dem Planer eine Entscheidungsgrundlage unter dem Aspekt der Energieeffizienz zu vermitteln.

Die Berücksichtigung der Arbeitssteuerung im Steuerungskreis wurde vorgenommen, um die Produktion permanent am energetisch bestmöglichen Betriebspunkt zu halten. Zusätzlich können durch die Wahl verschiedener Einsteuierungsstrategien energieintensive Teilauslastungen der Bearbeitungsmaschinen minimiert werden.

Das entwickelte Kennzahlensystem dient der umfassenden Bewertung der Szenarien. Es wurde als Rechensystem ausgeführt. Der Vorteil liegt insbesondere darin, dass sich die ausgewählten Kennzahlen mathematisch berechnen lassen. Dadurch ist eine maximale Transparenz und Möglichkeit der Anpassung an spezifische Problemstellungen gegeben. Die gewählten Kennzahlen wurden nach verschiedenen Kriterien bewertet, was zu einem größtmöglichen Ausschluss qualitativer Einflüsse bei der Kennzahlenbestimmung führt. Durch die multikriterielle Ausrichtung wird es dem Anwender zusätzlich ermöglicht, neben der Energie die klassischen Zielgrößen der Produktion (Qualität, Kosten, Zeit) explizit zu berücksichtigen. Um eine Optimierung der Produktion durchführen zu können ist es wichtig, diesen Zielpluralismus zu berücksichtigen. Aus dem Grund wurde eine Möglichkeit geschaffen, mit der eine Gütefunktion erarbeitet werden kann, welche die Zielgrößen Energie, Kosten, Zeit und Qualität mit individuellen Gewichtungsfaktoren belegt und in einer Kenngröße zusammenführt. Somit können verschiedene Szenarien direkt miteinander verglichen werden. Eine bidirektionale Kommunikation ermöglicht es zudem, den besten ermittelten Parametersatz entweder an die Arbeitsplanung oder an die Arbeitssteuerung zurückzuführen.

Der eigene Ansatz wurde anhand einer Werkstattfertigung eines Referenzbauteils validiert. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Methodik bei der Untersuchung von variablen Parametern in der Planung hinsichtlich der energetischen Optimierung unterstützen kann. Außerdem wurde aufgezeigt, dass die klassischen Zielgrößen der Produktion zusätzlich zur Energie mit einbezogen werden können. Das Ergebnis der Validierung des Planungskreises verdeutlicht, dass verschiedene Fertigungsstrategien deutlich unterschiedliche Energiebedarfe haben können, die in der konventionellen Arbeitsplanung bisher keine Beachtung fanden.

Die Anwendung der Methodik im Rahmen der Auftragsdurchsetzung in der Arbeitssteuerung hat ergeben, dass insbesondere in Teillastbereichen (d.h. wenn die Produktionsressourcen nicht zu 100% ausgelastet sind) große energetische Einsparpotentiale vorhanden sind, die durch ein situationsoptimales Auslasten und Ansteuern der Ressourcen genutzt werden können. Die Einführung einer belastungsorientierten Flusssteuerung und eines Energiesparmodus haben veranschaulicht, dass durch die organisatorische Optimierung der Produktion viele Potentiale hinsichtlich der Energieeffizienz genutzt werden können.

Die vorgestellte Methodik kann somit einen Beitrag zur Erhöhung der Energieeffizienz in der Produktion leisten.

7.2 Ausblick

Die entwickelte Methodik stellt einen Ansatz dar, mit dem eine Produktion unter Verwendung von Modellen energetisch geplant, bewertet und optimiert werden kann.

Die Modellerstellung, insbesondere die Modellierung der Wechselwirkungen der Ressourcen untereinander, ist sehr anwendungsfallspezifisch. Weitere Arbeiten müssen zeigen, wie die Modellerstellung automatisiert vorgenommen werden kann. Durch eine Automatisierung z.B. auf Basis von Planungsdaten ist mit einer erheblichen Zeitverkürzung für die Modellerstellung zu rechnen.

Auch die Erfassung der erforderlichen heterogenen Felddaten oder anderer erforderlicher Betriebsdaten ist sehr stark von einer manuellen Datenverarbeitung geprägt. Die vorgestellte F-EIDL Methodik ist dahingehend zu erweitern, dass eine automatisierte Anpassung des Datenmanagements erfolgen kann.

Abschließend ist festzustellen, dass die Methodik grundsätzlich in mehrere Richtungen erweitert werden kann, um sowohl die Prognosegenauigkeit weiter zu erhöhen als auch die Funktionalität auszubauen. Als konkreter Forschungsbedarf leiten sich die folgenden Themen ab:

- Weiterentwicklung des Entscheidungsablaufs zur Interpretation von Nachrichten beim Auftreten von Störungen und Ableitung von geeigneten Maßnahmen in der Auftragsdurchsetzung.
- Erweiterung um die mittel- und langfristigen Tätigkeiten der Arbeitsplanung, dass die Methodik z.B. auch für eine Fabrikneuplanung eingesetzt werden kann.
- Erweiterung der Optimierungsmöglichkeiten um Optimierungsalgorithmen mit nichtlinearem Charakter.
- Detaillierung der Modellierung der Hauptprozesse sowie der Peripherie.
- Erweiterung um thermische Modelle zur Berücksichtigung des dynamischen thermischen Verhaltens des betrachteten Gesamtsystems. Dieser Aspekt ist insbesondere bei der Entstehung von großen thermischen Energiemengen zu untersuchen.

Die Bearbeitung dieser Themen beinhaltet noch weit reichende Potentiale für die Zukunft.

Summary

The global demand of natural resources is rising constantly. This leads to shortages and thus to rising prices. Production will benefit from improving resource efficiency both from the economic and the environmental point of view. In order to increase energy efficiency in the production, the interrelations must be understood and existing control variables have to be identified.

The objective of this thesis was therefore to develop an approach to plan, evaluate and optimize energy efficiency in production.

Increasing energy efficiency and sustainable production are topics pushed forward strongly by both politics and consumers. Research institutes took up these topics. This has resulted in a variety of sophisticated approaches for energy evaluation and the optimization of production in various sectors. Relevant existing research approaches were checked in view of the problem specification of this thesis. It became apparent that some aspects of existing methodologies, such as the state-based modelling could be used in the context of this thesis.

The next step was the development of a model based approach. Based on a systems engineering model it is possible to provide a sufficiently accurate mapping between models of the resources and real production. This not only refers to the resources of the main processes, but also includes the peripheral systems which were both modelled and related to each other.

By extending the process planning and linking work plan and operational plan to the models, a functionality for examining various parameter constellations concerning their energetic impact has been developed.

Thus, the work planner is given opportunity to get a feedback concerning the energy efficiency and the energetic behaviour of the planned system.

The consideration of energetic aspects in the production planning and control allows operating the system continuously at the energetically best operating point. In addition, by choosing different control strategies, energy intensive partial load states of the resources can be minimized.

The developed key performance indicator (KPI) system is used for comprehensive evaluation of different scenarios. It is executed in the form of a calculating system. The main advantage is that ratios are calculated automatically which allows for a maximum transparency and the possibility of an adaptation to specific problems. Including the classic objectives of production too, the user of the KPI-system will not only consider energy consumption but also quality, costs and time. This is very important for optimizing production. To achieve this requirement a facility to create a power func-

tion was developed and integrated. It allows to weight the criteria with specific factors and to set them in relation to each other. Thus, different scenarios can be compared directly in relation to quality, costs, time and energy consumption. Bidirectional communication architecture provides for the possibility to transfer the evaluated and appropriate parameter set to the process planning or directly to the resources on the shop-floor.

The developed approach has been validated by the manufacturing of a reference component in a job-shop production scenario. It could be demonstrated that the methodology supports the examination of variable parameters of planning concerning energetic optimization. It has also been shown that the classic targets of production can be considered in addition to energy. The result of the validation illustrates that the energy consumption of different manufacturing strategies varies noticeably. These aspects are not considered yet in the traditional process planning process.

The application of this methodology in the processing of orders and the capacity planning has shown that there is a significant energy saving potential, especially in the partial load states of the resources which can be minimized by a situation optimal control.

The implementation of a load-dependent flow control and a power saving mode have illustrated that there is a substantial energy saving potential which can be realized by organizational optimization of production.

Therefore, the methodology presented in this thesis can contribute to increasing energy efficiency in production.

Literaturverzeichnis

- [Abele et al. 2012] Abele, E.; Schrems, S.; Schraml P.:
Energieeffizienz in der Fertigungsplanung: Frühzeitige Abschätzung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen in der Mittel- und Großserienfertigung.
In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012), Nr. 1/2, S. 38-42
- [Abele/Kuhrke 2010] Abele, E.; Kuhrke, B.:
Maximierung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen
In: MM - Das IndustrieMagazin. (2010), Ausgabe 9, S. 26-29.
- [ASR 2011] Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.4 (April 2011)
<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/ASR/ASR-A3-4.html> (21.02.2012)
- [Baetge 1974] Baetge, J.:
Betriebswirtschaftliche Systemtheorie: regelungstheoretische Planungs-Überwachungsmodelle für Produktion, Lagerung und Absatz. Opladen: Westdeutscher Verlag, 1974
- [Bauer 1988] Bauer, U.:
Kennzahlensystem im betrieblichen Energiemanagement.
Graz, Techn. Univ., Fak. für Maschinenbau, Diss., 1988
- [BDEW 2010] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.:
Endenergieverbrauch der Industrie (2010)
[http://www.bdew.de/bdew.nsf/id/DE_Druckvorlage_Entwicklung_des_Endenergieverbrauchs_der_Industrie/\\$file/Entwicklung%20Endenergieverbrauch%20Industrie.pdf](http://www.bdew.de/bdew.nsf/id/DE_Druckvorlage_Entwicklung_des_Endenergieverbrauchs_der_Industrie/$file/Entwicklung%20Endenergieverbrauch%20Industrie.pdf) (15.02.2011)
- [Berthold et al. 2005] Berthold, H. (Hrsg.), Berling, B., Thurn, W., Vogt, W.:
Kaspers/Küfner - Messen – Steuern – Regeln: Elemente der Automatisierungstechnik; 8. Auflage, Vieweg
Wiesbaden 2005
- [Beuermann et al. 1995] Beuermann, G.; Halfmann, M.; Böhm, M.:
Ökologieorientiertes Controlling (II).
In: WISU – Das Wirtschaftsstudium (1995), Nr. 5, S. 433-439
- [Binner 2005] Binner, H. F.:
Handbuch der prozessorientierten Arbeitsorganisation: Methoden und Werkzeuge zur Umsetzung.
2. Aufl., München; Wien: Hanser, 2005

- [BLFU 2007] Bayrisches Landesamt für Umweltschutz:
Druckluft im Handwerk. Energie sparen – Klima schützen – Kosten senken!
Augsburg, 2007
- [BMJ 2002] Bundesministerium der Justiz: Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung
und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung.
Berlin, 2002
- [BMJ 2010] Bundesministeriums der Justiz: Gesetz über Energiedienstleistungen und
andere Energieeffizienzmaßnahmen (EDL-G)
Berlin, 2010
- [BMU 1997] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, und Reaktorsicherheit (BMU)
(Hrsg.); Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.):
Leitfaden Betriebliche Umweltkennzahlen.
Bonn; Berlin, 1997
- [BMU 2001] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, und Reaktorsicherheit (BMU)
(Hrsg.); Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.):
Handbuch Umweltcontrolling.
2. Aufl., München: Vahlen, 2001
- [BMU 2007] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, und Reaktorsicherheit (BMU)
(Hrsg.):
Nachhaltigkeitsmanagement in Unternehmen – Von der Idee zur Praxis:
Managementansätze zur Umsetzung von Corporate Social Responsibility
und Corporate Sustainability (2007)
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nachhaltigkeitsmanagement_unternehmen.pdf (15.02.2012)
- [BMU 2009] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:
Energieeffizienz: Die intelligente Energiequelle, Tipps für Industrie und
Gewerbe (2009)
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_energieeffizienz_tipps.pdf (31.01.2012)
- [BMU 2010] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: DIN
EN 16001: Energiemanagementsysteme in der Praxis: Ein Leitfaden für
Unternehmen und Organisationen (2010)
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3959.pdf> (31.01.2012)
- [BMWi 2010] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi):
Energie in Deutschland –Trends und Hintergründe zur Energieversorgung
(2010)
<http://www.bmwi.de/Dateien/Energieportal/PDF/energie-in-deutschland,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>

- (31.01.2012)
- [Böning 1995] Böning, J. A.:
Methoden betrieblicher Ökobilanzierung.
2. Aufl., Marburg: Metropolis-Verlag, 1995
- [Bonneschky 2002] Bonneschky, A.:
Energiekennzahlen in PPS-Systemen.
(BTU Forschungshefte Energie; 4)
Cottbus, Techn. Univ., Diss., 2002
- [Boos/Kuhlmann 2010] Boos, W.; Kuhlmann, K.:
Bewertung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen.
In: wt Werkstattstechnik online 100 (2010), Nr. 5, S. 350-353
- [Bornhäuser 2009] Bornhäuser, M.:
Reifegradbasierte Werkstattsteuerung.
Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2009
(IPA-IAO Forschung und Praxis; 485)
Stuttgart, Univ., Diss., 2009
- [Bossel 2004] Bossel, H.:
Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation
komplexer Systeme.
Norderstedt: Books on Demand, 2004
- [Brecher et al. 2009] Brecher, C.; Boos, W.; Klein, W.; Kuhlmann, K.; Triebs, J.:
Ressourceneffizienzbewertung einer Werkzeugmaschine zur Steigerung
ihrer Wirtschaftlichkeit.
In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (2009), Nr. 9, S. 711-
715
- [Brecher et al. 2010a] Brecher, C.; Herfs, W.; Heyers, C.; Klein, W.; Triebs, J.; Beck, E.; Dorn, T.:
Ressourceneffizienz von Werkzeugmaschinen im Fokus der Forschung.
In: wt Werkstattstechnik online 100 (2010), Nr. 7/8, S. 559-564
- [Brecher et al. 2010b] Brecher, C.; Herfs, W.; Heyers, C.; Klein, W.; Triebs, J.; Bauer, S.:
Ressourceneffiziente Maschinensysteme.
In: Eversheim, W.; Pfeifer, T.; Weck, M.; Brecher, C.; Schmitt, R. H.;
Schuh, G.:
Ressourceneffiziente Produktionstechnik - ein Aachener Modell: Festschrift
für Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Fritz Klocke.
Aachen: Apprimus-Verl., 2010, S. 185-210
- [Bullinger et al. 2009] Bullinger, H.-J.; Spath, Dieter; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E. (Hrsg.):
Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung.
3. Aufl., Berlin u.a.: Springer, 2009

- [Caplice/Sheffi 1994] Caplice, C.; Sheffi, Y.:
A Review and Evaluation of Logistics Performance Measurement Systems.
In: The International Journal of Logistics Management 5 (1994), Nr. 2, S.
11-28
- [Claussen 1998] Claussen, J.:
Umweltkennzahlen als Steuerungsinstrument für das nachhaltige Wirtschaften von Unternehmen.
In: Seidel, E.; Clausen, J.; Seifert, E. K. (Hrsg.):
Umweltkennzahlen: Planungs-, Steuerungs- und Kontrollgrößen für ein umweltorientiertes Management.
München: Vahlen, 1998, S. 33-70
- [CSP 2009] China Statistics Press: China Statistical Yearbook (2009)
<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2009/indexeh.htm> (31.01.2012)
- [Delhi 1998], Delhi, M.:
Energieeinsparung in Industrie und Gewerbe: praktische Möglichkeiten des rationellen Energieeinsatzes in Betrieben.
Renningen-Malmsheim: expert, 1998
- [Dena 2010] Deutsche Energie-Agentur: dena-Referenzprojekt: Beleuchtungsoptimierung bei der ThyssenKrupp Steel AG (2010)
[http://www.energieeffizienz-im-service.de/innenraumbeluchtung/dena-referenzprojekte.html?tx_sbproref_pi1\[showUid\]=37&tx_sbproref_pi1\[view\]=pdf](http://www.energieeffizienz-im-service.de/innenraumbeluchtung/dena-referenzprojekte.html?tx_sbproref_pi1[showUid]=37&tx_sbproref_pi1[view]=pdf) (31.01.2012)
- [Destatis 2010] Statistisches Bundesamt, Umweltnutzung und Wirtschaft: Bericht zu den umweltökologischen Gesamtrechnungen.
Wiesbaden, 2010
- [Devoldere et al. 2007] Devoldere, T.; Dewulf, W.; Deprez, W.; Duflou, J.:
Improvement Potential for Energy Consumption in Discrete Part Production Machines.
In: 14th CIRP International conference on Life Cycle Engineering, 11.-13. Juni 2007, Tokio, Japan
Tokio, 2007, S. 311-316
- [Devoldere et al. 2008] Devoldere, T.; Dewulf, W.; Deprez, W.; Duflou, J.:
Energy Related Life Cycle Impact and Cost Reduction Opportunities in Machine Design: The Laser Cutting Case.
In: 15th CIRP International conference on Life Cycle Engineering, 17.-19. März 2008, Sydney, Australien
Sydney, 2008
- [Dietmair et al. 2008] Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, M.:

- Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile: Eine Methode zur effizienten Erfassung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen.
In: wt Werkstattstechnik online 98 (2008), Nr. 7/8, S. 640-645.
- [Dietmair/Verl 2010] Dietmair, A. ; Verl, A.:
Energy Efficiency Optimization in Production Planning and Control.
In: Ganjeizadeh, Farnaz: Proceedings of 20th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Intelligent Manufacturing and Services, 12.-14. Juli 2010, Oakland, CA, USA.
Hayward, CA, USA, 2010, S. 278-285
- [Dyckhoff/Spengler 2007] Dyckhoff, H.; Spengler, T. S.:
Produktionswirtschaft: Eine Einführung für Wirtschaftsingenieure.
2. Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer, 2007
- [Eberspächer et al. 2012] Eberspächer, P.; Haag, H.; Rahäuser, R.; Schlechtendahl, J.; Verl, A.; Bauernhansl, T.; Westkämper, E.:
Automated Provision and Exchange of Energy Information throughout the Production Process
In: 19th CIRP International conference on Life Cycle Engineering, 23.-25. Mai 2012, Berkley, USA
Berkley, 2012, S. 381-386
- [EEX 2011] EEX – European Energy Exchange: Marktdaten KWK-Index am Strom Spotmarkt. http://cdn.eex.com/document/52446/Phelix_Quarterly.xls (24.02.2012)
- [Engelmann 2009] Engelmann, J.:
Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fabriken.
(Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme; 71)
Chemnitz, Techn. Univ., Fak. Maschinenbau, Diss., 2009
- [ENRW 2005] Energieagentur NRW: Energieeffizienz in Unternehmen. Ein Leitfaden der Energieagentur NRW für Entscheider und Energieverantwortliche. Wuppertal, 2005
- [Eret/Meskell 2012] Eret, P.; Meskell, C.:
Compressed Air Leak Detection Using Microphone Array Techniques
In: 19th CIRP International conference on Life Cycle Engineering, 23.-25. Mai 2012, Berkley, USA
Berkley, 2012, S. 347-352
- [Erlach/Westkämper 2009] Erlach, K.; Westkämper, E. (Hrsg.):
Energiewertstrom: Der Weg zur energieeffizienten Fabrik.

- Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2009
- [EU 2006] Commission of the European Communities: Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential. (19.10.2006)
http://ec.europa.eu/energy/action_plan_energy_efficiency/doc/com_2006_0545_en.pdf (15.02.2012)
- [Eversheim 2002] Eversheim, W.:
Organisation in der Produktionstechnik: Arbeitsvorbereitung.
4. Aufl., Berlin u.a.: Springer, 2002
- [Fink et al. 1997] Fink, S.; Gaßner, M.; Günther-Pomhoff, C.; Schaefer, H.; Münzer, T.:
Leitfaden für das betriebliche Energiemanagement.
Berlin: Umweltbundesamt, 1997
- [Früh 2000] Früh, K. F. (Hrsg.):
Handbuch der Prozessautomatisierung: Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen.
2. Aufl., München: Oldenbourg, 2000
- [Gienke/Kämpf 2007] Gienke, H.; Kämpf, R.:
Handbuch Produktion: Innovatives Produktionsmanagement: Organisation, Konzepte, Controlling.
München: Hanser, 2007
- [Gronau 2005] Gronau, N.:
Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management: Architektur und Funktionen.
München: Oldenbourg, 2005
- [Günther 1994] Günther, E.:
Ökologieorientiertes Controlling: Konzeption eines Systems zur ökologieorientierten Steuerung und empirische Validierung.
München: Vahlen, 1994
- [Günther/Berger 2001] Günther, E. / Berger, A. (Hrsg.):
Konzeption eines Umweltkennzahlensystems zur Umweltleistungsmessung für Prozesse unter Beachtung der in Unternehmen vorliegenden Rahmenbedingungen.
Dresden, Techn. Univ., Fak. Wirtschaftswissenschaften, Diplomarbeit 2004
- [Haag et al. 2011] Haag, H. ; Siegert, J. ; Westkämper, E.:
Planning and Optimization of Energy Consumption in Factories Considering the Peripheral Systems.
In: Spath, D. (Hrsg.); Ilg, R. (Hrsg.); Krause, T. (Hrsg.); Fraunhofer IAO: Innovation in Product and Production: 21st International Conference on Production Research, 31. Juli – 04. August 2011, Stuttgart.

- Stuttgart: 2011
- [Haag et al. 2012] Haag, H.; Siegert, J.; Bauernhansl, T.; Westkämper, E.:
An Approach for the Planning and Optimization of Energy Consumption in
Factories Considering the Peripheral Systems
In: 19th CIRP International conference on Life Cycle Engineering, 23.-25.
Mai 2012, Berkley, USA
Berkley, 2012, S. 335-339
- [Hackstein 1989] Hackstein, R.:
Produktionsplanung und -steuerung (PPS): ein Handbuch für die Betriebs-
praxis.
2. Aufl., Düsseldorf : VDI Verlag, 1989
- [Haferkorn 2003] Haferkorn, H.:
Optik: physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen.
4. Aufl., Weinheim u.a.: Wiley-VCH, 2003
- [Hahne 2004] Hahne, E.:
Technische Thermodynamik: Einführung und Anwendung.
4. Aufl., München: Oldenbourg, 2004
- [Hallay 1992] Hallay, H.:
Öko-Controlling mit Hilfe von Kennzahlen – Ein Beispiel aus der metall-
verarbeitenden Industrie.
In: Clausen, J.; Hallay, H.; Strobel, M.:
Umweltkennzahlen für Unternehmen, Institut für ökologische Wirtschafts-
forschung – Diskussionspapier 20/92, Berlin, 1992, S. 1-9
- [Hallay/Pfriem 1992] Hallay, H.; Pfriem, R.:
Öko-Controlling: Umweltschutz in mittelständischen Unternehmen. Frank-
furt/Main u.a.: Campus, 1992
- [Henrich 2002] Henrich, P.:
Strategische Gestaltung von Produktionssystemen in der Automobilindust-
rie.
Aachen: Shaker, 2002
- [Herrmann et al. 2010] Herrmann, C.; Thiede, S.; Heinemann, T.:
Ganzheitliche Ansätze zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz
in der Produktion.
Produktion in Deutschland hat Zukunft – 10. Karlsruher Arbeitsgespräche
Produktionsforschung. Karlsruhe, 2010
- [Herrmann et al. 2011] Herrmann, C.; Thiede, S.; Heinemann, T.:
Synergies from Process and Energy Oriented Process Chain Simulation – A
Case Study from the Aluminium Die Casting Industry.

- In: Hesselbach, J. (Hrsg.); Herrmann, C. (Hrsg.): Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 02. - 04. Mai 2011, Braunschweig.
Berlin; Heidelberg: 2011, S. 317-322
- [Herrmann 2010] Herrmann, C.:
Ganzheitliches Life Cycle Management: Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen.
Berlin u.a.: Springer, 2010
- [Hopfenbeck/Jasch 1993] Hopfenbeck, W.; Jasch, C.:
Öko-Controlling. Umdenken zahlt sich aus! Umweltberichte, Audits und Ökobilanzen als betriebliche Führungsinstrumente.
Landsberg/Lech: Moderne Industrie, 1993
- [Horvath 2009] Horváth, P.:
Controlling.
11. Aufl., München: Vahlen, 2009
- [IEA 2008] International Energy Agency
World Energy Outlook 2008
<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/weo2008.pdf>
(28.2.2012)
- [Junge 2007] Junge, M.:
Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung.
Kassel: Kassel University Press, 2007
(Produktion & Energie; Band 1)
Kassel, Univ., Diss., 2007
- [Kampker et al. 2011] Kampker, A.; Gartzten, T.; Kamp, S.:
Intelligente Instandhaltung.
In: Energy 2.0 (2011), Nr. 8, S. 30-32
- [KfW 2005] KfW Bankengruppe (Hrsg.): KfW-Befragung zu den Hemmnissen und Erfolgsfaktoren von Energieeffizienz in Unternehmen (2005)
http://www.kfw.de/kfw/de/I/II/Download_Center/Fachthemen/Research/PDF-Dokumente_Sonderpublikationen/KfW-Befragung_zu_den_Hemmnissen_und_Erfolgsfaktoren_von_..._2005.pdf (31.01.2012)
- [Kirsch 2008] Kirsch, J.:
Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme.
Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2008
Karlsruhe, Univ., Fak. Bauingenieur, Geo- und Umweltwissenschaften,

- [Kletti 2007] Diss., 2008
Kletti, J.:
Konzeption und Einführung von MES-Systemen.
Berlin; Heidelberg: Springer, 2007
- [Köhrmann 2000] Köhrmann, C.:
Modellbasierte Verfügbarkeitsanalyse automatischer Montagelinien.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 2000
(Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 538)
Hannover, Univ., Diss., 2000
- [Krämer 2002] Krämer, K.: Automatisierung in Materialfluss und Logistik: Ebenen, Informationslogistik, Identifikationssysteme, intelligente Geräte.
Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2002
- [Kruska 2002] Kruska, M.:
Bewertung der Energieeffizienz von Industriebetrieben am Beispiel der Milchverarbeitung.
Aachen: Shaker, 2002
(Berichte aus der Energietechnik)
Aachen, RWTH, Fak. für Maschinenwesen, Diss., 2002
- [Kühn 2006] Kühn, W.:
Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner.
München; Wien: Hanser, 2006
- [Kupp 2008] Kupp, S.:
Der Weg zu optimierten Druckluftsystemen – Potenziale, Vorgehen, Umsetzung, Ergebnisse.
In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V.: Effiziente Energienutzung in der Produktion: Fachforum, 25.-26. Juni 2008, Regensburg
- [Küpper 2001] Küpper, H.-U.:
Controlling – Konzeption, Aufgaben, Instrumente.
3. Aufl., Stuttgart: Schäffler- Poeschel, 2001
- [Küpper 2005] Küpper, H.-U.:
Controlling – Konzeption, Aufgaben, Instrumente.
4. Aufl., Stuttgart: Schäffler- Poeschel, 2005
- [Leischnig 2009] Leischnig, S.:
Entwicklung standardisierter Abläufe zur Verbesserung der Prozesszuverlässigkeit von Fertigungsanlagen.
Chemnitz, Techn. Univ., Fak. für Maschinenbau, Diss., 2009
- [Leven 2005] Leven, B.:
Energiemanagement in der Investitionsgüterindustrie: Energieverbrauchs-

- struktur, Energiekennwerte und Rationelle Energieanwendung am Beispiel der Automobilindustrie.
Berlin: Mensch & Buch Verlag 2005
Stuttgart, Univ., Diss., 2005
- [Lickefett et al. 2009] Lickefett, M.; Erlach, K.; Pfeffer, M.; Adolf, T.; Hentschel, R.:
Die effiziente Fabrik: Fabrikplanung und Produktionsoptimierung.
In: 50 Jahre IPA: Wir produzieren Zukunft. Vorträge Industrietag:
02. Juli 2009, Stuttgart
- [Liebetruth 2005] Liebetruth, T.:
Die Informationsbasis des Supply Chain Controllings: Forschungsstand,
empirische Analyse, Gestaltungsempfehlungen.
Köln: Kölner Wissenschaftsverlag, 2005
- [Loew et al. 1997] Loew, T.; Kottmann, H., Clausen, J.:
Entwicklungsstand von Umweltkennzahlen und Umweltkennzahlensyste-
men in Theorie und Praxis. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung –
Diskussionspapier 40/97, Berlin, 1997
- [Loferer 2002] Loferer, M.:
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen.
München: Utz, 2002
(iwv Forschungsberichte; 162)
München, Techn. Univ., Fak. für Maschinenwesen, Diss., 2002
- [Löffler 2003] Löffler, Thomas:
Integrierter Umweltschutz bei der Produktionsstättenplanung.
(Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften
und Fabrikssysteme; 37)
Chemnitz, Techn. Univ., Fak. Maschinenbau, Diss., 2003
- [Lotter/Wiendahl 2006] Lotter, B; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.):
Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis. Ber-
lin; Heidelberg: Springer, 2006
- [Lucas 2008] Lucas, K.:
Thermodynamik: Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen.
7. Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer, 2008
- [Macharzina/Wolf 2010] Macharzina, K.; Wolf, J.:
Unternehmensführung: das internationale Management-wissen; Konzepte -
Methoden – Praxis.
7. Aufl., Wiesbaden: Gabler, 2010
- [Malik 2008] Malik, F.:
Strategie des Managements komplexer Systeme: Ein Beitrag zur Manage-

- ment-Kybernetik evolutionärer Systeme.
10. Aufl., Bern u.a.: Haupt Verlag, 2008
- [Martin et al. 2008] Martin, L.; Hesselbach, J.; Thiede, S.; Hermann, C., Lüdemann, B.; Detzer, R.:
Energieeffizienz durch optimierte Abstimmung zwischen Produktion und technischer Gebäudeausrüstung.
In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications, 13. Fachtagung, 1. und 2. Oktober 2008, Berlin.
Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008, S. 177-185
- [McKinsey 2010] McKinsey Deutschland: Willkommen in einer volatilen Welt - Herausforderungen für die deutsche Wirtschaft durch nachhaltig veränderte Märkte.
Frankfurt, 2010
- [Meier et al. 2009] Meier, H.; Khalaf, S.; Krings, R.:
Effizienz von Prozessen bewerten.
In: Werkstatt + Betrieb (2009), Nr. 12, S. 58-59
- [Meyer 2008] Meyer, K.:
Betriebswirtschaftliche Kennzahlen und Kennzahlen-Systeme.
5. Aufl., Sternenfels: Verlag Wissenschaft & Praxis, 2008
- [Müller et al. 2008] Müller, E.; Engelmann, J.; Strauch, J.:
Energieeffizienz als Zielgröße in der Fabrikplanung.
In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 98 (2008, Nr. 7/8, S. 634 - 639
- [Müller et al. 2009] Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.:
Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben.
Berlin; Heidelberg: Springer, 2009
- [Müller/Krämer 2001] Müller, P.-E.; Krämer, K.; REFA Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung:
BDE MDE Ident Report 2001: Das Handbuch zur Datenerfassung mit Marktübersicht, Anwenderberichten, Anbieterverzeichnis und Auswahlsoftware; Betriebsdatenerfassung, mobile Datenerfassung, Ident-Techniken (Auto-ID).
Darmstadt, 2001
- [Mussbach-Winter 2008] Mussbach-Winter, U.:
ERP und MES im Mittelstand: Chancen und Nutzen im Auftragsmanagement.
In: Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (Hrsg.): LogiMAT 2008: Internationale Fachmesse für Distribution, Material- und Informationsfluss, 19.-21. Februar 2008, Stuttgart.
- [Mussbach-Winter et al. 2010] Mussbach-Winter, U.; Wochinger, T.; Kipp, R.; Fraunhofer-Institut für

- Produktionstechnik und Automatisierung IPA (Hrsg.); Trovarit AG (Hrsg.):
Marktspiegel Business-Software MES - Fertigungssteuerung 2010/2011.
3. Aufl., Aachen: Trovarit AG, 2010
- [Mutscheller 1996] Mutscheller, A. M.:
Vorgehensmodell zur Entwicklung von Kennzahlen und Indikatoren für das
Qualitätsmanagement.
Bamberg: Difo-Bruck GmbH, 1996
St. Gallen, Univ., Diss., 1996
- [Neugebauer et al. 2008] Neugebauer, R. ; Westkämper, E. ; Klocke, F. ; u.a. ; Fraunhofer-
Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung: Energieeffizienz in
der Produktion : Abschlussbericht. Untersuchungen zum Handlungs- und
Forschungsbedarf, München, 2008.
- [Neugebauer et al. 2012] Neugebauer, R.; Putz, M.; Schlegel, A.; Langer, T.; Franz, S.; Lorenz, S.:
Energy-Sensitive Production Control in Mixed Model Manufacturing Pro-
cesses
In: 19th CIRP International conference on Life Cycle Engineering, 23.-25.
Mai 2012, Berkley, USA
Berkley, 2012, S. 399-404
- [Niemann 2007] Niemann, J.:
Eine Methodik zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktions-
systemen.
Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2007
(IPA-IAO Forschung und Praxis; 459)
Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau, Diss., 2007
- [Nyhuis/Wiendahl 2003] Nyhuis, P. ; Wiendahl, H.-P.:
Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen.
2. Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer, 2003
- [Pauksch 2008] Pauksch, E., Holsten, S., Linß, M., Tikal, F.:
Zerspanntechnik – Prozesse, Werkzeuge, Technologien
12. Aufl., Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2008
- [Pelte 2010] Pelte, D.:
Die Zukunft unserer Energieversorgung. Eine Analyse aus mathematisch-
naturwissenschaftlicher Sicht.
Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010
- [Preißler 2008] Preißler, P. R.:
Betriebswirtschaftliche Kennzahlen: Formeln, Aussagekraft, Sollwerte,
Ermittlungsintervalle.
München; Wien: Oldenbourg, 2008

- [Prognos 2010] Thamling, N., Seefeldt, Fr., Glöckner, U.:
Rolle und Bedeutung von Energieeffizienz und Energiedienstleistungen in
KMU (05.02.2010)
http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/Prognos_Rolle_und_Bedeutung_von_Energieeffizienz_und_Energiedienstleistungen_in_KMU.pdf (31.01.2012)
- [Pyper 2010] Pyper, M.:
Die Zukunft der Druckluft – Round Table zum Thema Druckluft.
In: fluid (2010), Nr. 10, S. 43-46
- [Radgen et al. 2001] Radgen, P.; Blaustein, E.:
Compressed Air Systems in the European Union. Energy, emissions, savings
potential and policy actions.
Stuttgart: LOGUL X, 2001
- [Rager 2008] Rager, M.:
Energieorientierte Produktionsplanung – Analyse, Konzeption und Umsetzung.
Wiesbaden: Gabler, 2008
Augsburg, Univ., Diss., 2006
- [Rahäuser et al. 2011] Rahäuser, R.; Pflüger, T.; Regenfelder, M.:
Economic potentials of improvements of energy efficiency in the supply of
cooling lubricants for metal cutting machine tools.
In: Management of Technology Step to Sustainable Production (MOTSP),
June 8-11, 2011, Brac, Croatia.
- [Rahäuser et al. 2012] Rahäuser, R.; Meier, M.; Klemm, P.:
Offene Potentiale im Kühlschmierstoffkreislauf -
Potential-Analyse und Lösungsansatz einer bedarfsgerechten Kühlschmier-
stoffreinigung
In: wt Werkstattstechnik online 102 (2012), Nr. 5, S. 299-305
- [Rattunde 1980] Rattunde, R.:
Optimierung der Tageslichtbeleuchtung großer Räume durch Oberlichter
unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Tageslichts.
Berlin, Techn. Univ., Diss., 1980
- [REFA 1973] REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.:
Methodenlehre des Arbeitsstudiums: Datenermittlung Teil 2.
3. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 1973
- [REFA 1991] REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.:
Methodenlehre der Betriebsorganisation: Planung und Steuerung Teil 3.
München: Carl Hanser Verlag, 1991

- [Reichmann 2001] Reichmann, T.:
Controlling mit Kennzahlen und Managementberichten : Grundlagen einer systemgestützten Controlling-Konzeption.
6., überarb. und erw. Aufl.. München: Vahlen, 2001
- [Reinhart et al. 2011] Reinhart, G.; Geiger, F.; Karl, F.; Widemann, M.:
Handlungsfelder zur Realisierung energieeffizienter Produktionsplanung und -steuerung.
In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011), S. 596-601
- [Ropohl 2009] Ropohl, G.:
Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik.
3. Aufl., Karlsruhe: Universitätsverlag, 2009
- [Ruppelt 2003] Ruppelt, E. (2003):
Druckluft-Handbuch.
4. Aufl., Essen: Vulkan, 2003
- [Ruppelt/Bahr 2010] Ruppelt, E.; Bahr, M.:
Abwärme bei Kompressoren Nutzen
In: Energy 2.0 Kompendium 2010, S. 182-184
www.energy20.net
- [Schäfer 2008] Schäfer, V.:
Energieerzeugung aus Niedertemperaturabwärme.
In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V.: Effiziente Energienutzung in der Produktion: Fachforum, 25.-26. Juni 2008, Regensburg
- [Scheermesser 2003] Scheermesser, S.:
Messen und Bewerten von Geschäftsprozessen als operative Aufgabe des Qualitätsmanagements.
Berlin; Wien; Zürich: Beuth, 2003
(FQS-Schrift; 86,02)
Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2002
- [Schenk/Wirth 2004] Schenk, M.; Wirth, S.:
Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik.
Berlin; Heidelberg: Springer, 2004
- [Schiefer 2001] Schiefer, E.:
Ökologische Bilanzierung von Bauteilen für die Entwicklung umweltgerechter Produkte am Beispiel spanender Fertigungsverfahren.
Aachen: Shaker, 2001
(Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung) Darm-

- [Schieferdecker et al. 2006] stadt, Techn. Univ., Fak. für Maschinenbau, Diss., 2000
Schieferdecker, B.; Fuenfgeld, C.; Bonneschky, A.:
Energiemanagement-Tools: Anwendung im Industrieunternehmen.
Berlin; Heidelberg [u.a.]: Springer, 2006
- [Schlag/Runzheimer 2001] Schlag, S.; Runzheimer, B.:
Balanced Scorecard im Produktionscontrolling: Anwendbarkeit und Ausgestaltung für den operativen Bereich.
1. Auflage. Wiesbaden: Gabler, 2001
- [Schlechtendahl et al. 2011] Schlechtendahl, J.; Haag, H.; Eberspächer, P.; Friedrich, J.; Verl, A.; Westkämper, E.:
Multilevel Control of Energy Consumption.
In: Spath, D. (Hrsg.); Ilg, R. (Hrsg.); Krause, T. (Hrsg.); Fraunhofer IAO: Innovation in Product and Production: 21st International Conference on Production Research, 31. Juli – 04. August 2011, Stuttgart.
Stuttgart: 2011
- [Schlosser et al. 2011] Schlosser, R.; Klocke, F.; Döbbeler, B.; Riemer, B. ; Hameyer, K.; Herold, T.; Zimmermann, W.; Nuding, B.; Schindler, A. ; Niemczyk, M.:
Assessment of Energy and Resource Consumption of Processes and Process Chains within the Automotive Sector.
In: Hesselbach, J. (Hrsg.); Herrmann, C. (Hrsg.): Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 02. - 04. Mai 2011, Braunschweig.
Berlin; Heidelberg: 2011, S. 45-50
- [Schmid 2004] Schmid, C.:
Energieeffizienz in Unternehmen: Eine wissensbasierte Analyse von Einflussfaktoren und Instrumenten.
Zürich: Hochschulverlag AG an der ETH Zürich
Zürich, ETH, Departement Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Diss., 2004
- [Schmid et al. 2003] Schmid, C.; Layer, G.; Radgen, P.; Layer, G., Arndt, U.; Carter, J.; Duschl, A.; Lilleike, J.; Nebelung, O.:
Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI); Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE): Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs branchenübergreifender Techniken in den Bereichen Industrie und Kleinverbrauch.
Karlsruhe; München, 2003
- [Schmigalla 1995] Schmigalla, H.; Verband der Automobilindustrie:
Fabrikplanung - Begriffe und Zusammenhänge.

- (REFA Fachbuchreihe Betriebsorganisation)
München u.a.: Hanser, 1995
- [Schröter et al. 2009] Schröter, M.; Weißfloch, U.; Buschak, D.:
Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung: Energieeffizienz in der Produktion - Wunsch oder Wirklichkeit? Energieeinsparpotenziale und Verbreitungsgrad energieeffizienter Techniken.
(Modernisierung der Produktion – Mitteilungen aus der ISI-Erhebung, Nr. 51)
Karlsruhe, 2009
- [Schuh et al. 2010] Schuh, G.; Kampker, A.; Franzkoch, B.; Kamp, S.:
Energieeffiziente Fabrik – vom Klimaschutz zur Wirtschaftlichkeit.
In: Eversheim, W.; Pfeifer, T.; Weck, M.; Brecher, C.; Schmitt, R. H.; Schuh, G.:
Ressourceneffiziente Produktionstechnik - ein Aachener Modell: Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Fritz Klocke.
Aachen: Apprimus-Verl., 2010, S. 239-260
- [Shell 2008] Shell Inc.: Shell energy scenarios to 2050, Shell International BV (2008)
http://www-static.shell.com/static/aboutshell/downloads/our_strategy/shell_global_scenarios/SES%20booklet%2025%20of%20July%202008.pdf
(24.2.2012)
- [Staehe 1969] Staehle, W. H.:
Kennzahlen und Kennzahlensysteme als Mittel der Organisation und Führung von Unternehmen.
Wiesbaden: Gabler, 1969
- [Steins 2000] Steins, D.:
Entwicklung einer Systematik zur qualitätsgerechten Optimierung komplexer Produktionssysteme.
Aachen: Shaker, 2000
- [Stiens 2000] Stiens, H.:
Ermittlung des ganzheitlichen Wirkungsgrades als Kennzahl zur rationellen Energienutzung in der Produktionstechnik.
Aachen: Shaker, 2000
(Umformtechnische Schriften; 95)
Aachen, RWTH, Fak. für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften, Diss., 2000
- [Strobel 1992] Strobel, M.:
Ein ökologieorientiertes Kennzahlensystem.
In: Clausen, J.; Hallay, H.; Strobel, M.:

- Umweltkennzahlen für Unternehmen, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung – Diskussionspapier 20/92, Berlin, 1992, S. 21-37
- [Verl et al. 2011] Verl, A.; Westkämper, E.; Abele, E.; Dietmair, A.; Schlechtendahl, J.; Friedrich, J.; Haag, H.; Schrems, S.:
Architecture for Multilevel Monitoring and Control of Energy Consumption.
In: Hesselbach, J. (Hrsg.); Herrmann, C. (Hrsg.): Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 02. - 04. Mai 2011, Braunschweig.
Berlin; Heidelberg: 2011, S. 317-322
- [Victor 1969] Victor, H.:
Schnittkraftberechnungen für das Abspannen von Metallen.
Wt.-Z. und Fertig. 59 (1969), Nr. 7, S. 317-327
- [Wagner 2009] Wagner, W.:
Kreiselpumpen und Kreiselpumpenanlagen.
3. Aufl., Würzburg: Vogel, 2009
- [Wahren 2010] Wahren, S.:
Energieeffizienz in der Produktion - TEEM und Best-Practice Beispiele.
In: Westkämper, E. (Hrsg.) ; Verl, A. (Hrsg.): Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Internationale Stoffverbote, RoHS, REACH, EuP sowie ElektroG/WEEE in der Praxis: ExFo 2010 Expertenforum Abschlussstagung, 9. Dezember 2010, Stuttgart.
Stuttgart: FpF - Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, 2010, S. 161-174
- [Walz/Rüsing 2011] Walz, R.; Rüsing, E.:
Wie ERP-Systeme in der Fertigung den Energieverbrauch reduzieren.
In: MM – MaschinenMarkt (2011), Nr. 22, S. 60-62
- [Weck/Brecher 2006] Weck, M.; Brecher, C.:
Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme: 4. Automatisierung von Maschinen und Anlagen.
6. Aufl., Berlin: Springer, 2006
- [Weinert 2010] Weinert, N.:
Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme.
Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2010
(Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin)
Berlin, Techn. Univ., Diss., 2010
- [Weismann 2008] Weismann, U.:
Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling.

- Aachen: Shaker, 2008.
(Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik Universität Karlsruhe (TH); 144)
Karlsruhe, Univ., Fak. für Maschinenbau, Diss., 2008
- [Wellenreuther/Zastrow 2005] Wellenreuther, G.; Zastrow, D.:
Automatisieren mit SPS: Theorie und Praxis.
3. Aufl., Wiesbaden: Vieweg 2005
- [Westkamp et al. 2010] Westkamp, Markus ; Kuhlmann, Timm ; Erlach, Klaus:
Energiewertstrom : Energiesicht im Produktionswertstrom
In: Industrie Management. 26 (2010), Nr. 5, S. 55-57.
- [Westkämper 2006] Westkämper, E.:
Einführung in die Organisation der Produktion.
Berlin u.a. : Springer, 2006
- [Westkämper/Verl 2011] Westkämper, E. (Hrsg.); Verl, A. (Hrsg.):
Green Automation: Grün produzieren und Grünes produzieren.
Fraunhofer IPA Technologieforum, 29. März 2011, Stuttgart
(Fraunhofer IPA-Tagung; F 228)
Stuttgart: FpF - Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, 2011
- [Westkämper/Zahn 2009] Westkämper, E. (Hrsg.); Zahn, E. (Hrsg.):
Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell.
Berlin; Heidelberg: Springer, 2009
- [Westphal et al. 2011] Westphal, F.; Behnke, S.; Rahäuser, R.:
Energieeffizienz in der Produktion.
Vortrag auf der GSaME-Jahrestagung 11.02.2011, Stuttgart
- [Wiendahl 1997] Wiendahl, H.-P.:
Betriebsorganisation für Ingenieure.
4. Aufl., München; Wien: Hanser, 1997
- [Wiendahl 2007] Wiendahl, H.-H.:
Turbulence Germs and their impact on planning and control -
Root causes and Solutions for PPC-Design.
In: CIRP Annals Manufacturing Technology 56 (2007), Nr. 1, S. 443-446.
- [Wiendahl 2010] Wiendahl, H.-P.:
Betriebsorganisation für Ingenieure.
7. Aufl., München: Hanser, 2010
- [Wiendahl et al. 1999] Wiendahl, H.-P.; Bürkner, S.; Lorenz, B.:
Schwachstellenanalyse an hochautomatisierten Anlagen – Der Mensch ist

- nicht ersetzbar.
In: Industrie Management 15 (1999), Nr. 2, S. 22-25
- [Zacher 2000] Zacher, S. (Hrsg.):
Automatisierungstechnik kompakt: Theoretische Grundlagen, Entwurfsmethoden, Anwendungen.
Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 2000
- [Zwingel 1997] Zwingel, T.:
Einsatzmöglichkeiten und Grenzen von Kennzahlen und Kennzahlensystemen im Rahmen eines ökologischen Controllingkonzepts.
München: VVF, 1997
(Schriftenreihen zum Finanz-, Prüfungs- und Rechnungswesen; 19)
Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1996
- Normen und Richtlinien**
- [DIN 25424-1] Norm DIN 25 424 Teil 1 1981-09: Fehlerbaumanalyse: Methode und Bildzeichen
- [DIN 62264-1] Norm DIN IEC 62264 Teil1 2008-06: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen –Teil 1: Modelle und Terminologie (IEC 62264-1:2003);
Deutsche Fassung EN 62264-1:2008
- [DIN EN 12464-1] Norm DIN 12464 Teil 1 2011-08: Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen
- [DIN EN 16001] Norm DIN EN 16001 2009-08: Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung; Deutsche Fassung EN 16001:2009
- [DIN EN ISO 14031] Norm DIN EN ISO 14031 2000-02: Umweltmanagement - Umweltleistungsbewertung - Leitlinien
- [DIN EN ISO 14001] Norm DIN EN ISO 14001 2009-11: Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 14001:2004 + Cor. 1:2009);
Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14001:2004 + AC:2009
- [DIN ISO 14040] Norm DIN EN ISO 14040 2009-11: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006
- [DIN V 18599 Bbl. 1] Norm DIN V 18599 Beiblatt 1 2010-01: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Beiblatt 1: Bedarfs-/Verbrauchsabgleich
- [DIN V 18599-1] Norm DIN V 18599-1 Teil 1 2005-07: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung –Teil 1: Allgemeine

- Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger
- [DIN V 18599-2] Norm DIN V 18599 Teil 2 2005-07: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen
- [DIN V 18599-3] Norm DIN V 18599 Teil 3 2007-02: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 3: Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung
- [DIN V 18599-4] Norm DIN V 18599 Teil 4 2007-02: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung
- [DIN V 18599-7] Norm DIN V 18599 Teil 7 2007-02: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 7: Endenergiebedarf von Raumluftechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau
- [DIN V 18599-8] Norm DIN V 18599 Teil 8 2007-02: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssysteme
- [VDI 3035] Richtlinie VDI 3035 2008-05: Gestaltung von Werkzeugmaschinen, Fertigungsanlagen und peripheren Einrichtungen für den Einsatz von Kühlschmierstoffen
- [VDI 3633-1] Richtlinie VDI 3633 Blatt 1 1996-11: Simulation von Logistik, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffsdefinition
- [VDI 4600] Richtlinie VDI 4600 1997-06: Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden
- [VDI 4602] Richtlinie VDI 4602 2006-04: Energiemanagement - Begriffe, Definitionen
- [VDI 4661] Richtlinie VDI 4661 2003-09: Energiekenngrößen – Definitionen, Begriffe, Methodik
- [VDI 5600] Richtlinie VDI 5600 Blatt 1 2007-12: Fertigungsmanagementsysteme

Anhang

Tabelle 7-1: Energiegehalte und Umrechnungsfaktoren [DIN V 18599 Bbl. 1]

Energieträger	Mengen- einheit	Heizwert H_i	Brennwert H_s	Verhältnis Brennwert/ Heizwert	Hinweise
Heizöl leicht	L	etwa 10,0 kWh/l	etwa 10,6 kWh/l	1,06	-
Heizöl schwer	kg	etwa 10,9 kWh/kg	etwa 11,6 kWh/kg	1,06	-
Erdgas H (Erdgas E)	m ³	etwa 10,4 kWh/m ³	etwa 11,5 kWh/m ³	1,11	Energiegehalt des Lieferanten verwenden
Erdgas L (Erdgas LL)	m ³	etwa 8,9 kWh/m ³	etwa 9,8 kWh/m ³	1,11	
Stadtgas	m ³	etwa 4,5 kWh/m ³	etwa 5,0 kWh/m ³	1,11	
Flüssiggas	kg	etwa 13,0 kWh/kg	etwa 14,2 kWh/ kg	1,09	
Steinkohle	kg	etwa 8,8 kWh/kg	etwa 9,0 kWh/ kg	1,02	-
Braunkohle	kg	etwa 5,5 kWh/kg	etwa 5,9 kWh/ kg	1,07	-
Koks	kg	etwa 8,0 kWh/kg	etwa 8,3 kWh/ kg	1,04	-
Holz	kg	etwa 4,1 kWh/kg	etwa 4,4 kWh/ kg	1,08	Für lufttrockenes Holz
Holzpellets	kg	etwa 5,0 kWh/kg	etwa 5,4 kWh/ kg	1,08	-
Holzhack- schnittel	SRm	etwa 650 kWh/SRm	etwa 700 kWh/SRm	1,08	Bezogen auf Schüttraummeter
Nah- und Fern- wärme	kWh	-	-	1,00	Umrechnung nicht erforderlich
Strom	kWh	-	-	1,00	

Tabelle 7-2: Kriterien zur Bewertung von Kennzahlen

Kriterium	Bedeutung
Reproduzierbarkeit, Vergleichbarkeit [BMU 1997], [Böning 1995], [Claussen 1998]	Beschreibung von Durchführung und Resultaten in einer Weise, die ein genaues Nachvollziehen sowie eine Wiederholung der Resultate (Kontinuität) und Überprüfung durch Dritte ermöglicht
Datenerfassung, Messaufwand, Angemessenheit [Böning 1995], [Zwingel 1997]	Messtechnischer Aufwand zur Erfassung der Kennzahl und wirtschaftliches Verhältnis zwischen dem Aufwand zur Erfassung und Aussagekraft/Nutzen der Kennzahl
Aussagefähigkeit [Mutscheller 1996]	Eignung der Kennzahl um die erforderliche Genauigkeit der für die bearbeitete Fragestellung relevanten Angaben zu erreichen
Validität [Caplice/Sheffi 1994], [Liebetruth 2005]	Gültigkeit der Kennzahl, Die Validität gibt die Eignung eines Messverfahrens oder einer Frage bezüglich ihrer Zielsetzung an. Eine Messung ist valide, wenn die erhobenen Werte geeignete Kennzahlen für die zu untersuchende Fragestellung liefern
Objektivität [Liebetruth 2005], [Mutscheller 1996]	Unabhängigkeit der Beschreibung der Kennzahl vom Beobachter. Die Beurteilung der Objektivität ist gerade dann interessant, wenn eine menschliche Beurteilung zur Ermittlung des Wertes einer Kennzahl erforderlich ist. Werden Kennzahlen rechnerisch (automatisiert) erzeugt, kann die Objektivität der Messung als gegeben vorausgesetzt werden
Prognosemöglichkeit [Küpper 2001]	Eignung der Kennzahl, um auf Grundlage heutiger Daten, Aussagen über zukünftige Entwicklungen zu treffen
wesentlich/eindeutig [BMU 1997], [Claussen 1998], [Günther 1994], [Zwingel 1997]	Klarheit in der Aussagekraft der Kennzahlen für den Verwender
adaptiv [BMU 1997], [Günther 1994],	Fähigkeit der Kennzahl, an unterschiedliche Bedingungen angepasst zur werden (Erweiterbarkeit); hinreichende Sensitivität bei

[Zwingel 1997]	Leistungsänderungen
Allgemeingültigkeit [Liebetruth 2005]	Eignung der Kennzahl zur Durchführung von z.B. Benchmarks
Gesamtziel [BMU 1997], [DIN EN 16001]	Inwieweit leistet die Kennzahl einen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz (Wichtung der einzelnen Kennzahlen) in Bezug auf die konkrete Aufgabenstellung

In der Arbeit wird ein modellbasierter Ansatz erarbeitet, mit dem das energetische Verhalten einer Produktion bewertet und verbessert werden kann. Hierbei werden die peripheren Bereiche sowie die Arbeitsplanung detailliert berücksichtigt und mit einbezogen, da diese Aspekte einen wichtigen Einfluss auf den Energieverbrauch einer Produktion haben. Zudem unterstützt ein Kennzahlensystem bei der Auswahl von alternativen Produktionsszenarien.

ISBN 978-3-8396-0547-9



FRAUNHOFER VERLAG