



Egon Müller
Jörg Engelmann
Thomas Löffler
Jörg Strauch

Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben

 Springer

Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben

Egon Müller • Jörg Engelmann • Thomas Löffler
Jörg Strauch

Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben

 Springer

Prof. Dr.-Ing. Egon Müller
Technische Universität Chemnitz
Professur für Fabrikplanung und
Fabrikbetrieb
09107 Chemnitz
egon.mueller@mb.tu-chemnitz.de

Dr.-Ing. Thomas Löffler
Technische Universität Chemnitz
Professur für Fabrikplanung und
Fabrikbetrieb
09107 Chemnitz
thomas.loeffler@mb.tu-chemnitz.de
und
IREGIA e. V.
Reichenhainer Str. 34-36
09126 Chemnitz
loeffler@iregia.de

Dr.-Ing. Jörg Engelmann
Volkswagen Sachsen GmbH
Werktechnik / Umweltplanung
08048 Zwickau
joerg.engelmann@volkswagen.de

Dr.-Ing. Jörg Strauch
Technische Universität Chemnitz
Professur für Fabrikplanung und
Fabrikbetrieb
09107 Chemnitz
joerg.strauch@mb.tu-chemnitz.de

ISBN 978-3-540-89643-2 (Hardcover)

ISBN 978-3-642-31945-7 (Softcover)

e-ISBN 978-3-540-89644-9

DOI 10.1007/978-3-540-89644-9

Springer Dordrecht Heidelberg London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009, Softcover 2013

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandentwurf: eStudio Calamar S.L., Figueres/Berlin

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Die steigenden Energiepreise der letzten Jahre haben sowohl Bürger als auch die Industrie alarmiert. An vielen Stellen wurde begonnen, Konsumgewohnheiten zu überdenken und zu verändern. Energiesparende Produkte gewinnen zunehmend Marktanteile. Mit zahllosen Programmen und Projekten wird auf nahezu allen Gebieten versucht, eine auch künftig ausreichende, bezahlbare und klimaverträgliche Energieversorgung zu sichern. Unter den dazu verfolgten Handlungsansätzen kommt der Steigerung der Energieeffizienz unumstritten eine Schlüsselrolle zu.

Vorliegendes Buch verfolgt das Ziel, den energiepolitischen Handlungsansatz Energieeffizienzsteigerung für die Fabrikplanung und den Fabrikbetrieb zu operationalisieren. Der Fokus richtet sich dabei vor allem auf die Stückgutindustrie mit den für Deutschland und Europa so wichtigen Branchen Maschinenbau und Automobilproduktion. Gerade in diesen Branchen wurde der sparsame Umgang mit dem Produktionsfaktor Energie bisher oft vernachlässigt.

Angesichts der ehrgeizigen politischen Zielstellung – die Energieproduktivität soll sich bis 2020 verdoppeln – werden alle, auch die eher wenig energieintensiven Branchen, einen substanziellen Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz leisten müssen. In Folge der veränderten politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen werden auch die Märkte in einem stärkeren Maße energiesparende Produkte und energiesparende Produktionsverfahren nachfragen. Energieeffizienz dürfte sich daher zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor der Zukunft entwickeln.

Eine höhere Energieeffizienz lässt sich in der Industrie kaum durch Einzelmaßnahmen wie die Gebäudedämmung oder die Einführung von Energieeffizienzmotoren erreichen. Ursachen hierfür sind die komplexen technischen Abhängigkeiten in den Fabriken und zahlreiche konkurrierende Zielstellungen wie Produktivität, Flexibilität, Verfügbarkeit, Qualität oder Wartungsfreundlichkeit. Eine große Stärke erfolgreicher Industrieunternehmen war und ist es, solche komplexen Anforderungen in adäquate, individuell angepasste Fabrikstrukturen und Betriebsweisen zu übersetzen. Dies braucht kompetente und kreative Führungskräfte und Mitarbeiter, die künftig verstärkt auch energetisches Know-how in Planung und Betrieb von Fabriken einbringen.

Mit vorliegendem Buch soll dazu beigetragen werden, die Sensibilisierung der Unternehmen für Energiethemen zu erhöhen sowie fachliche und methodische Kompetenzen für eine stärkere Energieeffizienzorientierung beim Planen und Betreiben von Fabriken zu vermitteln. Das Buch richtet sich dabei gleichermaßen an betriebliche Entscheider, Planungs- und Betriebsingenieure und an Studierende, die in diesen Gebieten tätig werden wollen.

Die Inhalte des Buches basieren auf zahlreichen Vorarbeiten, die über viele Jahre in Forschung und Lehre an der Professur für Fabrikplanung und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Chemnitz geleistet wurden. Die Autoren danken an dieser Stelle Emeritus Prof. Dr. Dr.-Ing. Siegfried Wirth, der innerhalb der Chemnitzer Professur frühzeitig den Schwerpunkt „Fabrikökologie“ etablierte und damit eine langfristige Profilbildung ermöglichte.

Vor allem aktuell laufende und jüngst beendete Forschungsprojekte waren und sind untrennbar mit der Erarbeitung vorliegenden Buches verbunden. Ohne die großzügige Förderung dieser Projekte durch die Europäische Union*, das Bundesministerium für Bildung und Forschung** und das Sächsische Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst*** wären viele Recherchen, Untersuchungen und Erkenntnisgewinne nicht möglich gewesen. Ein großer Dank gebührt auch allen Projektpartnern, von deren vertrauensvoller Kooperation, hohen Kompetenz und Kreativität die wissenschaftliche Arbeit stets profitierte.

Ein besonderer Dank richtet sich an die Volkswagen Sachsen GmbH, namentlich an Herrn Horst Döhler, Leiter Werktechnik. Neben der Dissertation von Dr.-Ing. Jörg Engelmann entstand aus dieser Zusammenarbeit die bereits zum wiederholten Male durchgeführte Fachtagung „Die Energieeffiziente Fabrik in der Automobil-Industrie“. Die vielen interessanten Vorträge und Diskussionen mit den Tagungsteilnehmern waren eine weitere Quelle, aus der vorliegende Arbeit schöpfte.

Für die Ermutigung, dieses Buchprojekt in Angriff zu nehmen, danken wir Frau Eva Hestermann-Beyerle. Als Programmplanerin des Springer-Verlags gewährte sie uns gemeinsam mit Frau Birgit Kollmar-Thoni eine stete und geduldige Unterstützung.

Einen unschätzbaren Beitrag zur Fertigstellung des Buches lieferte Frau Heike Wähler. Ihr danken wir für die sorgfältige Korrektur und die wertvolle Unterstützung bei der Erstellung von Tabellen und Abbildungen. Wertvolle Beiträge lieferten auch Dr.-Ing. Sebastian Horbach, Robert Tästensen und Colin Schönfeld.

Chemnitz und Zwickau im Mai 2009

Egon Müller
Jörg Engelmann
Thomas Löffler
Jörg Strauch

* IEC-SME (Improving Energy Competence on SME level), gefördert im Programm Intelligent Energy Europe und betreut von der Executive Agency for Competitiveness and Innovation

** Projekt PEACH (Planung und Steuerung energieeffizienter Anlagen), gefördert innerhalb des Rahmenkonzepts „Forschung für die Produktion von morgen“ und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA), Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PFT) betreut

*** eniPROD (Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovation in der Produktionstechnik), gefördert als Spitzentechnologiecluster innerhalb der Sächsischen Landesexzellenzinitiative

Inhalt

Inhalt	VII
Verwendete Kurzzeichen	XIII
Formelzeichen	XIII
Einheiten	XV
Vorzeichen der Einheiten	XVI
Chemische Zeichen	XVII
Abkürzungen	XVII
1 Energieeffizienz – Herausforderung an Fabriken des 21. Jahrhunderts	1
1.1 Motivation	1
1.2 Externe Treiber	3
1.2.1 Wirkungsgefüge Fabrik, Umwelt, Gesellschaft	3
1.2.2 Energiepreise	6
1.2.3 Energienachfrage	10
1.2.4 Energiereserven und Versorgungssicherheit	11
1.2.5 Energie und Umweltbelastungen	13
1.2.6 Energie und Politik	17
1.3 Interne Treiber	21
1.4 Status quo in Industrie und Wissenschaft	22
1.4.1 Energieverbrauch und Einsparpotenziale	22
1.4.2 Energiekompetenzen in der Industrie	24
1.4.3 Energieberatung	29
1.4.4 Energieeffizienz in den Betriebswissenschaften	29
1.5 Zusammenfassung	30
Literatur	32
2 Beschreibungsmodelle der Fabrik	35
2.1 Definition und Bedarf an Fabrikmodellen	35
2.2 Die Fabrik als System	35
2.2.1 Systemtheoretische Grundlagen	35
2.2.2 Definition der Fabrik als System	37
2.2.3 Hierarchische Ordnung der Fabrik	41
2.2.4 Periphere Ordnung der Fabrik	43
2.3 Die Fabrik in der Lieferkette	47
2.4 Die Fabrik – Station im Produktlebensweg	50
2.5 Der Fabriklebenszyklus	53
2.6 Führungs- und Zielsystem	57

2.7 Zusammenfassung	64
Literatur	65
3 Energetische Grundlagen	67
3.1 Physikalische Grundzusammenhänge	67
3.2 Energieumwandlungskette	72
3.3 Grundlagen ausgewählter Formen der Energie und Arbeit	77
3.3.1 Mechanische Energie und mechanische Arbeit	77
3.3.2 Thermische Energie und Wärme	79
3.3.3 Elektrische Energie und elektrische Arbeit	83
3.4 Energiewirtschaftliche Grundlagen	89
3.4.1 Elektrizitätswirtschaft	89
3.4.1.1 Struktur der Elektrizitätswirtschaft	89
3.4.1.2 Energiewirtschaftliche Verträge und Tarife	92
3.4.1.3 Netzqualität	97
3.4.2 Gaswirtschaft	101
3.5 Zusammenfassung	105
Literatur	108
4 Planung energieeffizienter Fabriken.....	109
4.1 Methodische Grundlagen der Fabrikplanung	109
4.1.1 Begriff und Abgrenzung	109
4.1.2 Vorgehensweise der Fabrikplanung	110
4.1.2.1 Planungsphasen	110
4.1.2.2 Planungsaktivitäten	111
4.1.2.3 Planungsschritte	113
4.1.3 Planungsgrundsätze	118
4.1.4 Energieeffizienz als neue Planungsanforderung	120
4.2 Integration von Energieeffizienz-Aspekten in die Fabrikplanung	121
4.2.1 Handlungsansätze zur Energieeffizienz-Steigerung	121
4.2.1.1 Überblick	121
4.2.1.2 Substitution der eingesetzten Energieträger	124
4.2.1.3 Minderung des Bedarfs an Nutzenergie	124
4.2.1.4 Steigerung des Wirkungsgrads	125
4.2.1.5 Reduktion von Verlusten	127
4.2.1.6 Energierückgewinnung	128
4.2.1.7 Weiternutzung von Anfall-Energie	128
4.2.2 Rückkopplung zwischen Fabrikplanung und Fabrikbetrieb	128
4.2.3 Simultane Produkt-, Prozess- und Anlagenplanung	130
4.3 Methodik zur energieeffizienzorientierten Fabrikplanung	131
4.3.1 Überblick	131
4.3.2 Planungsaktivität Systemanalyse	133
4.3.3 Planungsaktivität Systemkonzipierung	137
4.3.4 Planungsaktivität Systemsynthese und Integration	138
4.3.4.1 Überblick	138

4.3.4.2 Funktionsbestimmung.....	139
4.3.4.3 Dimensionierung.....	143
4.3.4.4 Strukturierung.....	148
4.3.4.5 Gestaltung.....	149
4.3.5 Planungsaktivität Begleitung der Systemrealisierung.....	150
4.3.6 Nutzung.....	156
Literatur.....	157
5 Energierrelevante Prozesse und Anlagen.....	159
5.1 Überblick.....	159
5.2 Anlagen zur Übertragung und Nutzung von Elektroenergie.....	160
5.2.1 Betriebliche Elektroenergieverteilung.....	160
5.2.1.1 Einspeisung und Umspannung.....	160
5.2.1.2 Blindleistungskompensation.....	166
5.2.2 Anlagen zur Elektroenergie-Anwendung.....	167
5.2.2.1 Elektromechanische Antriebe.....	167
5.2.2.2 Druckluft.....	173
5.2.2.3 Beleuchtung.....	183
5.2.2.4 Thermische Energie aus Elektroenergie.....	189
5.2.2.5 Sonstige aus Elektroenergie gewandelte Energiearten.....	190
5.2.2.6 Informations-, Kommunikations- und Steuerungstechnik.....	191
5.3 Prozesswärme.....	192
5.3.1 Anwendung.....	192
5.3.2 Erzeugung von Prozesswärme.....	194
5.3.3 Wärmerückgewinnung.....	199
5.3.4 Übertragung von Prozesswärme.....	201
5.3.5 Nutzung von Prozesswärme.....	202
5.3.6 Zusammenfassung.....	202
5.4 Prozesskälte.....	203
5.4.1 Anwendung.....	203
5.4.2 Erzeugung.....	204
5.4.3 Zusammenfassung.....	208
5.5 Heizung, Lüftung, Klimatisierung.....	208
5.5.1 Funktion.....	208
5.5.1.1 Überblick.....	208
5.5.1.2 Physiologische Anforderungen.....	210
5.5.1.3 Technologische Anforderungen.....	213
5.5.1.4 Anforderungen des Umweltschutzes.....	214
5.5.2 Planung von HLK-Anlagen.....	215
5.5.2.1 Überblick.....	215
5.5.2.2 Detaillieren der Aufgabenstellung.....	216
5.5.2.3 Minderung der Belastung.....	217
5.5.2.4 Konzeption der Lüftung.....	218
5.5.2.5 Konzeption der Heizung.....	226
5.5.3 Zusammenfassung.....	229

5.6 Gebäude	232
5.6.1 Überblick	232
5.6.2 Gebäudeanordnung und -ausrichtung	233
5.6.3 Gebäudegestalt	235
5.6.4 Gebäudezonierung	238
5.6.5 Gebäudekonstruktion	239
5.6.6 Fenster, Türen, Tore	246
5.6.7 Zusammenfassung	250
Literatur	252
6 Analyse und Bewertung des Energieverbrauchs	255
6.1 Messkonzept	255
6.2 Messgrößen und Messwertaufnehmer	261
6.3 Messwertverarbeitung	262
6.4 Messwertauswertung	264
6.4.1 Verbraucherstrukturanalyse	264
6.4.2 Ganglinien und Dauerlinien	268
6.4.3 Analyse von Realisierungschancen	274
6.5 Spezielle Messverfahren und Messgeräte	275
6.5.1 Elektroenergie	275
6.5.1.1 Überblick	275
6.5.1.2 Multimeter-Datenlogger als mobiles Universalmessgerät	276
6.5.1.3 Fest installierte Messgeräte	278
6.5.2 Druckluft	280
6.5.2.1 Überblick	280
6.5.2.2 Kalorimetrische Durchflussmessung	281
6.5.2.3 Ermittlung der Leckagevolumen und Leckagerate	282
Literatur	285
7 Zusammenfassung und Ausblick	287
Glossar	291
Anhang A: Checkliste Energiekompetenz	301
A.0 Einführung	301
A.1 Stammdaten	302
A.2 Energieverbrauch	303
A.3 Elektroenergie	304
A.3.1 Strombezug	304
A.3.2 Stromeinspeisung/-transformation	305
A.3.3 Blindstromkompensation	306
A.3.4 Motoren und Antriebe	307
A.3.5 Druckluft	310
A.3.6 Beleuchtung	314
A.3.7 Bürotechnik, Informationsverarbeitung und -übertragung	316

A.4 Thermische Energie	317
A.4.1 Prozesswärme	317
A.4.2 Prozesskälte	318
A.4.3 Gebäudeheizung	320
A.4.4 Dezentrale Warmwasserbereitung	323
A.4.5 Raumlüftung	323
A.4.6 Kraft-Wärme-Kopplung	325
A.4.7 Wärmerückgewinnung	326
A.5 Erneuerbare Energien	326
A.6 Gebäudehülle	328
Anhang B: Investitionsrechnung	331
Literatur	334
Sachwortverzeichnis	335

Verwendete Kurzzeichen

Formelzeichen

Zeichen		Größe
$\cos \varphi$...	Leistungsfaktor
α	...	Wärmeübergangszahl
α	...	Bindungsfaktor für Base-Anteil (Arbeitspreiskalkulation)
β	...	Bindungsfaktor für Peak-Anteil (Arbeitspreiskalkulation)
ε	...	Emissionsgrad
η	...	Wirkungsgrad, Nutzungsgrad
λ	...	Wärmeleitfähigkeit (Wärmeleitzahl)
μ	...	Reibungszahl
μ_s	...	Belastungsgrad
φ	...	Phasenverschiebungswinkel
Φ	...	Lichtstrom
ρ	...	spezifischer elektrischer Widerstand
ρ	...	Reflexionsgrad
ρ	...	Rohdichte
ω	...	Winkelgeschwindigkeit
a	...	Auszahlung
a	...	Beschleunigung
A	...	Fläche
AP	...	Arbeitspreis
b	...	Breite
b	...	Wärmeeindringkoeffizient
c	...	Schadstoffkonzentration
c	...	spezifische Wärmekapazität
c_s	...	spezifische Schmelzwärme
c_v	...	spezifische Verdampfungswärme
C	...	Wärmekapazität
C_s	...	Strahlungszahl des schwarzen Körpers
d	...	Schichtdicke
E	...	Beleuchtungsstärke
e	...	Einzahlung
E	...	Energie
f_p	...	Primärenergiefaktor
F	...	Frequenz
F	...	Kraft

XIV Verwendete Kurzzeichen

G	...	Eigenabweichung des Messgeräts
g	...	Erdbeschleunigung
g	...	Gleichzeitigkeitsfaktor
h	...	Höhe
H _S	...	Brennwert
i	...	Kalkulationszinssatz
I	...	Lichtstärke
I	...	Stromstärke
J	...	Trägheitsmoment
k	...	Bindungsfaktor
k	...	Raumfaktor
K	...	Kosten
KW	...	Kapitalwert
l	...	Länge
L	...	Indexpreis
L	...	Leuchtdichte
L _{LP}	...	Lichtpunkthöhe
LP	...	Leistungspreis
LR	...	Leckagerate
m	...	Masse
M	...	Drehmoment
n	...	Anzahl, Stückzahl
n	...	Drehzahl
n	...	Nutzungsgrad
N	...	Nachlass
p	...	Druck
P	...	Leistung, elektrische Wirkleistung
P	...	Flickerstärke
P ₀	...	Leerlaufverlust (Transformator)
P _{el}	...	elektrische Leistung
P _K	...	Kurzschlussverlust (Transformator)
P _r	...	Bemessungsleistung
P _V	...	Verlustleistung
Q	...	Blindleistung
Q	...	Ladung
Q	...	Wärme (Wärmemenge)
Q̇	...	Wärmestrom
r	...	Radius
R	...	elektrischer Widerstand, Wärmedurchlasswiderstand
R	...	spezifische Gaskonstante
R _T	...	Wärmedurchgangswiderstand

s	...	Schichtdicke
s	...	Wärmespeicherzahl
s	...	Weg
S	...	Scheinleistung
t	...	Anzahl der Perioden
t	...	Zeit
T	...	Periode
T	...	Temperatur
u	...	Momentanspannung
\hat{u}	...	Scheitelwert
U	...	Spannung
U	...	Wärmedurchgangskoeffizient
v	...	Geschwindigkeit
V	...	Volumen
\dot{V}	...	Volumenstrom
W	...	Arbeit, auch Energie
WF	...	Wartungsfaktor (früher Verminderungsfaktor)
x	...	Messwert
z	...	Anzahl
z	...	Zahlung
z_0	...	Gegenwartswert, Barwert

Einheiten

Symbol	Einheit
°C	... Grad Celsius
€	... Euro
\$... US-Dollar
a	... Jahr
A	... Ampere
bar	... Bar
cal	... Kalorie
cd	... Candela
d	... Tag
eV	... Elektronenvolt
g	... Gramm
h	... Stunde
Hz	... Hertz
J	... Joule

XVI Verwendete Kurzzeichen

K	...	Kelvin
l	...	Liter
lm	...	Lumen
lux	...	Lux
m	...	Meter
m ³	...	Kubikmeter
min	...	Minute
N	...	Newton
Nm	...	Newtonmeter
pm	...	Pondmeter
RÖE	...	Rohöleinheit
s	...	Sekunde
SKE	...	Steinkohleneinheiten
t	...	Tonne
toe	...	tonnes oil equivalent, Tonnen Erdöläquivalent
V	...	Volt
VA	...	Voltampere
VAh	...	Voltamperestunde
var	...	Var
W	...	Watt
Wh	...	Wattstunde
Ws	...	Wattsekunde

Vorzeichen der Einheiten

Vorsilbe der Einheit	Vorzeichen	Faktor	Faktor in Worten
Peta	P	10 ¹⁵	Billiarde
Tera	T	10 ¹²	Billion
Giga	G	10 ⁹	Milliarde
Mega	M	10 ⁶	Million
Kilo	k	10 ³	Tausend
Dezi	d	10 ⁻¹	Hundertstel
Zenti	c	10 ⁻²	Zehntel
Milli	m	10 ⁻³	Tausendstel
Mikro	μ	10 ⁻⁶	Millionstel
Nano	n	10 ⁻⁹	Milliardstel
