AutoUni – Schriftenreihe

Patrick Dehning

Steigerung der Energieeffizienz von Fabriken der Automobilproduktion

AutoUni – Schriftenreihe

Band 104

Herausgegeben von/Edited by
Volkswagen Aktiengesellschaft
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet den Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.
Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches.
Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen, fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their doctor’s theses within the “AutoUni Schriftenreihe” free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses.
The AutoUni’s nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of knew knowledge.
In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor’s theses is one of such offers.
The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

Herausgegeben von/Edited by
Volkswagen Aktiengesellschaft
AutoUni
Brieffach 1231
D-38436 Wolfsburg
http://www.autouni.de

Weitere Bände in der Reihe http://www.springer.com/series/15136

Patrick Dehning

Steigerung der Energieeffizienz von Fabriken der Automobilproduktion

Springer

Patrick Dehning
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2017

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe
ISBN 978-3-658-19097-2 ISBN 978-3-658-19098-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-19098-9

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
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.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Nachhaltiges Wirtschaften erfordert neben dem Einsatz erneuerbarer Energien die gezielte Reduzierung von Energieverbräuchen in der Herstellung von Produkten. Auch wenn Energiekosten häufig nur einen kleineren Teil der Gesamtkosten einer Fabrik ausmachen, so ist das systematische Erschließen von Energieeffizienzpotenzialen zunehmend ein wichtiger Treiber sowohl von Produkt- als auch von Prozessinnovationen. Unternehmen verankern daher zunehmend Energieeffizienzziele in ihren Unternehmenszielen. Ein Beispiel ist der Vision-Pull-Ansatz „Think Blue. Factory." der Marke VW der Volkswagen AG. Bis 2018 sollen die produktionsbedingten Umweltbelastungen jedes Fahrzeugs und Komponententeils um 25 % gegenüber 2010 gesenkt werden.

Ein zielgerichtetes Erschließen von Effizienzpotenzialen verlangt ein ganzheitliches, systemorientiertes Verständnis von Fabriken. Dies umfasst insbesondere ein erweitertes Prozessverständnis mit allen Eingangs- und Ausgangsgrößen einschließlich der Berücksichtigung der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA). Um die Energieeffizienz in Fabriken systematisch zu steigern, fehlen häufig die messtechnischen Voraussetzungen für eine Erfassung der erforderlichen Prozess- und Energiedaten sowohl auf der Ebene der Produktionsmaschinen und -anlagen als auch auf der Ebene der Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung. Aber auch wenn relevante Energiedaten vorliegen, kann zwar die Energieproduktivität nicht aber unmittelbar die Energieeffizienz bewertet werden. Hierfür ist ein Vergleich mit einem theoretischen Minimum oder einem Benchmark (z.B. über Best Available Technologies) erforderlich. Während Benchmark-Werte auf der Ebene von Komponenten (z.B. Pumpen, Elektromotoren) in der Regel vorhanden sind oder mit vertretbarem Aufwand ermittelt werden können, fehlen diese Werte, wenn ganze Gewerke oder sogar Fabriken im Hinblick auf ihre Energieeffizienz analysiert und bewertet werden sollen. Zudem fehlt häufig eine methodische Unterstützung, um geeignete Maßnahmen oder Maßnahmenbündel zur Steigerung der Energieeffizienz auszuwählen. Gerade in großen Organisationen mit mehreren Produktionsstandorten sind die Potenziale eines organisationalen Lernens – im Sinne einer kontinuierlichen Verbesserung der Energieeffizienz – häufig noch nicht erschlossen.

Herr Dehning hat in seiner Dissertation die resultierenden Fragestellungen untersucht und einen eigenen methodenbasierten Ansatz aufbauend auf der Weiterentwicklung und Kopplung bekannter Modelle und Methoden entwickelt.

Braunschweig — Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Konzernforschung der Volkswagen AG, Abteilung "Umwelt Produktion", von 2013 bis 2016. Hiermit möchte ich allen danken, die mich bei der erfolgreichen Erstellung dieser Arbeit sowie meiner persönlichen und fachlichen Weiterentwicklung unterstützt haben.

Ich bedanke mich bei meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann für die Unterstützung, die methodischen Diskussionen und die herzliche Begleitung dieser Dissertation. Gleichfalls danke ich Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die Übernahme der Zweitprüfung und Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ein großer Dank geht an Dr. Benjamin Boehnke für die Betreuung, den immer offenen Austausch und die vielen Anregungen die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.
Ebenfalls möchte ich Dr.-Ing. Sebastian Thiede für seine Unterstützung im Rahmen der Veröffentlichungen ein großes Dankeschön aussprechen.

Für das entgegengebrachte Vertrauen möchte ich mich bei meinem Abteilungsleiter Dr.-Ing. Liendel Chang und Unterabteilungsleiter Christoph Nieschwietz bedanken, welche mich inhaltlich und organisatorisch unterstützt haben. Mein Dank geht ebenfalls an meine Kollegen die mich durch den Entstehungsprozess dieser Arbeit begleitet haben.

Auch meinen Freunden und insbesondere meiner Freundin Natalie, die mich über die letzten Jahre immer unterstützt, ermutigt und zum Lachen gebracht haben möchte ich danken.

Zu guter Letzt möchte ich diese Arbeit meinen Eltern Angelika Dehning und Rudolf Eisele widmen, die es mir ermöglicht haben dies zu erreichen. Ohne eure Unterstützung und Liebe würde ich heute nicht dort sein wo ich bin.

Braunschweig

Patrick Dehning

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ..... **XI**

Abkürzungsverzeichnis ..... **XV**

1 Einleitung **1**

1.1 Problemstellung und Motivation 1

1.2 Ziel und Struktur der Arbeit 4

2 Energieeinsatz in der Fahrzeugfertigung **7**

2.1 Produktion und Fertigung 7

2.1.1 Die Produktionsumgebung als Teil der Fabrik 7

2.1.2 Peripherer Aufbau der Produktionsumgebung 9

2.1.3 Prozesse der Fahrzeugfertigung 10

2.2 Energieflüsse im industriellen Kontext 12

2.2.1 Energieumwandlung und Energieformen 12

2.2.2 Energieeffizienz 16

2.2.3 Betriebliche Energiekennzahlen 16

2.2.4 Einflussfaktoren auf die Energiebilanz eines Betriebes 20

2.2.5 Energieeffizienzpotentiale und -barrieren 22

2.3 Energieflüsse in der Automobilfertigung 26

2.3.1 Energetische Kennzahlen in Automobilunternehmen 26

2.3.2 Energieverbraucher im Fahrzeugbau 30

3 Stand der Forschung **37**

3.1 Auswahl relevanter Ansätze und Kriterien 37

3.2 Bestehende Ansätze zur energetischen Verbesserung der Produktion 41

3.2.1 Benchmarking und Vergleichsansätze 41

3.2.2 Methodische Ansätze zur Analyse und Verbesserung 42

3.3 Zusammenfassung bestehender Ansätze 46

3.4 Ableitung des Forschungsbedarfs 48

4 Konzeptentwicklung **49**

4.1 Identifikation energieeffizienter Produktionsbereiche 51

4.1.1 Auswahl geeigneter Bilanzgrenzen 52

4.1.2 Datengenerierung 55

4.1.3 Datenverifizierung 56

4.1.4 Modellerstellung 56

4.1.5 Modellprüfung ... 61
4.2 Identifikation und Analyse von Effizienzlösungen ... 62
4.2.1 Nutzung interner Wissensbasis ... 63
4.2.2 Qualitätsprüfung von Maßnahmen ... 69
4.2.3 Identifikation und Priorisierung von Maßnahmen ... 69
4.3 Maßnahmenauswahl und Potentialanalyse ... 79
4.3.1 Maßnahmenauswahl ... 79
4.3.2 Potentialbewertung und Zielwertkalkulation ... 85
4.4 Generierung von Effizienzwissen ... 87
4.4.1 Lastkennzahlen für Produktionsprozesse ... 88
4.4.2 Parameterbestimmung für eine energieeffiziente Produktion ... 90

5 Modellerstellung auf Standortebene ... 95
5.1 Auswahl von Einflussfaktoren auf Standortebene ... 95
5.2 Datengenerierung und -verifizierung des Standortmodells ... 96
5.3 Formulierung des linearen Regressionsmodells für Standorte ... 97
5.4 Standortmodellanwendung ... 101

6 Anwendung Gesamtkonzept am Beispiel der Lackiererei ... 103
6.1 Identifikation energieeffizienter Lackierereien ... 104
6.1.1 Datengenerierung und Datenverifizierung ... 104
6.1.2 Modellerstellung und Validierung ... 105
6.1.3 Energieeffizienzanalyse und Identifikation der Best Practice Lackiererei ... 110
6.2 Energieeffizienzmaßnahmen für die Best Practice Lackiererei ... 112
6.2.1 Identifikation und Qualitätsprüfung von Maßnahmen ... 114
6.2.2 Gewichtung und Priorisierung von Maßnahmen ... 115
6.3 Potentialbewertung und Ermittlung des spez. Energiebedarfs ... 117
6.4 Wissensgenerierung ... 123

7 Zusammenfassung und Ausblick ... 129
7.1 Zusammenfassung ... 129
7.2 Konzeptevaluation ... 130
7.3 Ausblick ... 132

8 Literaturverzeichnis ... 133

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung von Treibhausgasemissionen weltweit nach Quelle 2012 1
Abbildung 2: Entwicklung der Energieintensität im Bereich des Aluminiumschmelzens 2
Abbildung 3: Entwicklung der Energieintensität der europäischen Automobilhersteller 3
Abbildung 4: Struktur der Arbeit und Zielstellung der Kapitel 5
Abbildung 5: Aufbau eines Fabriksystems 8
Abbildung 6: Physische Produktionsumgebung 9
Abbildung 7: System peripherer Ordnung 10
Abbildung 8: Gewerke des Fahrzeugbaus und Hauptfertigungsverfahren nach DIN 8580 11
Abbildung 9: Beispiellastgang und Nutzung zur Ermittlung der elektrischen Arbeit 13
Abbildung 10: Energienutzungskette 15
Abbildung 11: Regelkreis der Kybernetik 17
Abbildung 12: Verwendungszeck von Kennzahlen 18
Abbildung 13: Einflussfaktoren auf die Energiekennzahlen 21
Abbildung 14: Gründe zur Begünstigung der Effizienzlücke 23
Abbildung 15: Kontinuierliche Verbesserung im Rahmen der ISO 50001 24
Abbildung 16: Energieplanungsprozess nach ISO 50001 25
Abbildung 17: Ebenen in Unternehmen der Automobilfertigung 26
Abbildung 18: Spezifische Energieverbräuche von Automobilkonzernen und Marken 28
Abbildung 19: Gewerke des Fahrzeugbaus inklusive der Energieflüsse und Energieverteilung 31
Abbildung 20: Bilanzraum des Karosseriebaus 32
Abbildung 21: Bilanzraum für das Gewerk Lackiererei 33
Abbildung 22: Bilanzraum für das Gewerk Montage 34
Abbildung 23: Kontinuierlicher Verbesserungsprozess 45
Abbildung 24: Ziele des entwickelten Verbesserungskonzeptes 49
Abbildung 25: Schritte zur Verbesserung bestehender Automobilfabriken 50
Abbildung 26: Phasen zur Identifikation energieeffizienter Prozesse 51
Abbildung 27: Nutzung der Regressionskurve zur Identifikation energieeffizienter Gewerke 61
Abbildung 28: Vorgehen zur Auswahl und Analyse von Effizienzmaßnahmen 63
Abbildung 29: Struktur des Wissensmanagement in Unternehmen 64

Abbildung 30: Wirkweisen von Energieeffizienzmaßnahmen 66
Abbildung 31: Entwickelter Aufbau von Energieeffizienzmaßnahmen 69
Abbildung 32: Weg der Energieeffizienzmaßnahme zur Anwendung in den Gewerken 70
Abbildung 33: Umsetzungscheckliste für priorisierte Maßnahmen 80
Abbildung 34: Maßnahmenportfolio für investive Maßnahmen 81
Abbildung 35: Maßnahmenportfolio für nicht-investive Maßnahmen 82
Abbildung 36: Ablaufplan der Maßnahmenauswahl für das Best Practice Gewerk 83
Abbildung 37: Beispielhafte Darstellung einer Wechselwirkungsmatrix für die identifizierten Maßnahmen 84
Abbildung 38: Vernetzungsdiagramm für die Wechselwirkung von Maßnahmen 85
Abbildung 39: Verbesserungsschritte für die Zielwertkalkulation des idealen Energiebedarfs 86
Abbildung 40: Ausgabe der verbesserten ELK anhand eines Säulendiagrammes 87
Abbildung 41: Energetische Zustände von Prozessanlagen inklusive Peripherie erster und zweiter Ordnung 90
Abbildung 42: Energieverbrauch der individuellen Prozessschritte eines Gewerkes 91
Abbildung 43: Verbrauchsgruppen der betrachteten Einzelgewerke 93
Abbildung 44: Auswertung der Effizienzterme (u_i) auf Standortebene 102
Abbildung 45: Vorgehen für die Niedrigenergielackiererei 103
Abbildung 46: Normalverteilungskurve mit (a) und ohne Ausreißer (b) 104
Abbildung 47: Standardisierte Koeffizienten β* mit den entsprechenden Standardfehlern aus dem finalen Lackmodell 109
Abbildung 48: Entwicklung von Energieverbräuchen bei steigender Produktionsstückzahl 110
Abbildung 49: Vergleich einzelner Lackierereien mit der Regressionsgerade 111
Abbildung 50: Ermittelte Energieeffizienzterme für die betrachteten Lackierereien 111
Abbildung 51: Eingabemaske für Energieeffizienzmaßnahmen mit einer fiktiven Maßnahme 112
Abbildung 52: Vorgehen zur Ableitung der Priorisierten Checkliste für die Lackiererei 113
Abbildung 53: Einschränkung der betrachteten Maßnahmen für die Fallstudie 114
Abbildung 54: Eingabemaske für die Grunddaten des Best Practice Gewerks 116
Abbildung 55: Anwenderoberfläche für die Kriteriengewichtung 117
Abbildung 56: Checkliste für nicht-investive Maßnahmen der Best Practice Lackiererei und Maßnahmenportfolio 118
Abbildung 57: Checkliste für investive Maßnahmen der Best Practice Lackiererei und das Maßnahmenportfolio 120
Abbildung 58: Wechselwirkungsmatrix für die ausgesuchten Maßnahmen der Lackiererei 121

Abbildung 59: Vernetzungsdiagramm für die ausgesuchten Maßnahmen der Lackiererei.. 122

Abbildung 60: Ermittlungsoberfläche für die Berechnung der Potentiale..... 122

Abbildung 61: Darstellung der erreichbaren Energieleistungskennzahl 123

Abbildung 62: Verteilung des spez. Energieverbrauchs nach Prozessschritten innerhalb der Lackiererei..... 124

Abbildung 63: Eingabeoberfläche für die Betriebsparameter der Lackiererei 126

Abbildung 64: Ablauf innerhalb des Excel Tools zur Wissensgenerierung 127

Abbildung 65: Verkleinerung der Energieeffizienzlücke mit Hilfe des entwickelten Gesamtkonzeptes..... 129

Abkürzungsverzeichnis

AG	Automatisierungsgrad
AL	Auslastung
Az	Amortisationszeit
BC	Base Coat/ Basislack
CC	Clear Coat/ Klarlack
CDP	Climate Disclosure Project
DEA	Data Envelopment Analysis
E_CO2	Einsparpotential CO2
EE	Einsparpotential Energie
EM	Einsparpotential Monetär
EMAS	eco-management and audit scheme
ELK	Energieleistungskennzahl
Ep	Absolutes Einsparpotential einer Maßnahme
EPA	Environmental Protection Agency
EV	Absoluter Energieverbrauch
EF	Emissionsfaktor
F	aktueller Fluss (Methode der ökologischen Knappheit)
FF	Fahrzeuggrundfläche
FG	Fahrzeuggewicht
FK	Folgekosten einer Maßnahme
FO	Lackierte Fahrzeugoberfläche
FR	Fahrzeugradstand
FV	Fahrzeugvolumina
Fzg	Fahrzeug
GG	Gebäudegrundfläche
GPFG	Norwegian Government Pension Fund Global
GRI	Global Reporting Initiative
HG	Härtegrad
HGT	Heizgradtage
IH	Investitionshöhe
N	Nutzwert
OEM	Original Equipment Manufacturer
PVC	Polyvinylchlorid
RobecoSAM	Dow Jones Sustainability Index
SDEA	Stochastic Data Envelopment Analysis
SFA	Stochastic Frontier Analysis
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TNV	Thermische Nachverbrennung
TPS	Toyota Produktionssystem
UBS	Unterbodenschutz
VBA	Excel Visual Basics
VIF	Variance Inflation Factor

1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die Problemstellung und die Motivation für die Erstellung der vorliegenden Arbeit vorgestellt. Anschließend werden das Ziel und die Struktur der Arbeit näher erläutert.

1.1 Problemstellung und Motivation

Die weltweit steigenden CO_2-Emissionen führen zu einer allmählichen Erwärmung der Atmosphäre (Herrmann 2010, S. 158). Dieser Klimawandel hat unter anderem Dürren, das Schmelzen der Eiskappen oder das verstärkte Auftreten von Wetterphänomenen wie El Niño zur Folge (Meehl et al. 2007, S. 747–752). Im Rahmen der weltweit positiven wirtschaftlichen Entwicklung der letzten Jahrzehnte sind auch die globalen Treibhausgasemissionen in den letzten zwei Jahrzehnten um über 30% angestiegen (WRI 2015a). Die Nutzung und Umwandlung von fossilen Energiequellen sind in diesem Zusammenhang die Haupttreiber von Treibhausgasemissionen und somit des Klimawandels, wie in Abbildung 1 dargestellt (WRI 2015b). Es zeigt sich, dass die Erzeugung und Nutzung von Energie fast dreiviertel der gesamten erzeugten CO_2 Emissionen weltweit verursacht.

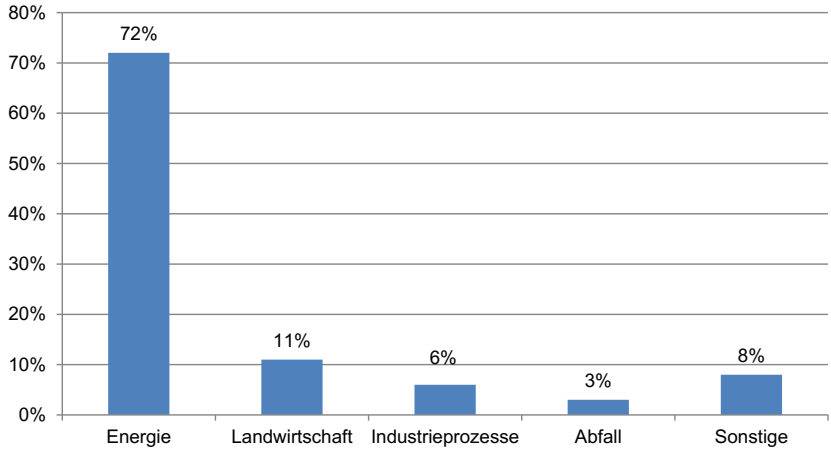

Abbildung 1: Verteilung von Treibhausgasemissionen weltweit nach Quelle 2012 (WRI 2015b)

Dabei teilte sich die Nutzung von Energie in Deutschland 2015 auf vier Sektoren auf, Verkehr (29,5%), Industrie (29,0%), Haushalte (25,8%) und Dienstleistungssektor (15,7%) (AGEB 2016). Dies zeigt, dass neben dem Verkehr der industrielle Energiebedarf einen großen Anteil an Treibhausgasemissionen darstellt.

Eine Möglichkeit der Beschränkung der Treibhausgasemissionen ist die effizientere Nutzung von Energie als Ressource. Dies spiegelt sich auch in einer immer stärkeren Regulierung durch

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
P. Dehning, *Steigerung der Energieeffizienz von Fabriken der Automobilproduktion*, AutoUni – Schriftenreihe 104,
DOI 10.1007/978-3-658-19098-9_1

die nationalen und europäischen Gesetzgeber wider. Beispiele hierfür sind die Energieeinsparverordnung oder die sogenannte Ökodesignrichtlinie (Bundesrepublik Deutschland 2007; Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union 2009a). Neben der Fokussierung des Gesetzgebers auf dieses Thema rücken Umweltaspekte immer mehr in den Blickpunkt von weiteren Stakeholdern, wie Anteilseigner und Investmentfonds, die einen immer stärkeren Fokus auf Bewertungen von Umweltaspekten legen (Dimson et al. 2013). Diese Bewertungen werden zum Beispiel durch CDP (Carbon Disclosure Project) oder auch den Dow Jones Sustainability Index durchgeführt (CDP 2014; RobecoSAM 2015). Durch diese äußeren Treiber und durch den technischen Fortschritt der letzten Jahrzehnte haben sich diverse Branchen bereits sehr stark einem energetischen Optimum bzw. einer thermodynamischen Grenze angenähert. Darunter sind zum Beispiel die Aluminium- und Eisenhersteller. Dies ist erkennbar an den stark sinkenden Energieaufwendungen für die Schmelzung eines Kilogramms Aluminium beziehungsweise Roheisen (Gutowski et al. 2013, S. 6). Die Reduzierung der Energieintensität im Bereich des Aluminiumschmelzens ist in Abbildung 2 dargestellt.

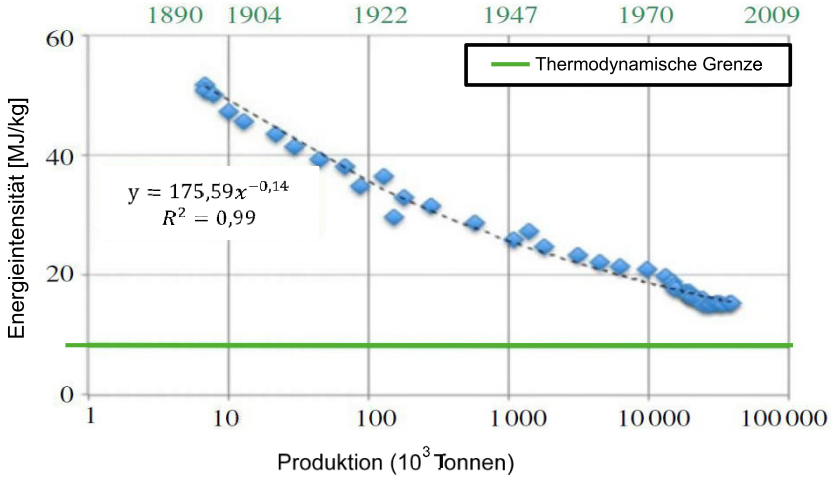

Abbildung 2: Entwicklung der Energieintensität im Bereich des Aluminiumschmelzens (Gutowski et al. 2013, S. 6)

In dieser Abbildung ist erkennbar, dass sich die Energieintensität über die letzten Jahre immer mehr der thermodynamischen Grenze annähert und somit die physikalischen Grenzen im Bereich der Energieeffizienz immer näher rücken. Die Bestimmung der thermodynamischen Grenze ermöglicht es Unternehmen konkrete Werte für die Zielerreichung zu identifizieren und festzulegen. Die Bestimmung dieser Grenzen der Effizienz ist aber bisher nur bei einzelnen, klar abgegrenzten Prozessen mit überschaubarem Aufwand möglich.

Die Energieintensität der europäischen Automobilindustrie ist in den letzten Jahren analog zu der der Aluminiumschmelzereien gesunken, wie es ein Vergleich der Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigt. Es sind die durchschnittliche Energieintensität der im ACEA (European Automobile Manufacturers Association) verbundenen Automobilunternehmen über die letzten 10 Jahre

dargestellt. Des Weiteren sind der ideale Energiebedarf und die thermodynamische Grenze dargestellt, welche für die Automobilproduktion noch unbekannt sind (Zein 2013, S. 19; Gutowski et al. 2013, S. 6). Dabei beschreibt der ideale Energiebedarf den Bedarf an Energie nachdem alle kosteneffizienten Maßnahmen umgesetzt und bisher nicht entdeckte Potentiale gehoben wurden (Zein 2013, S. 20).

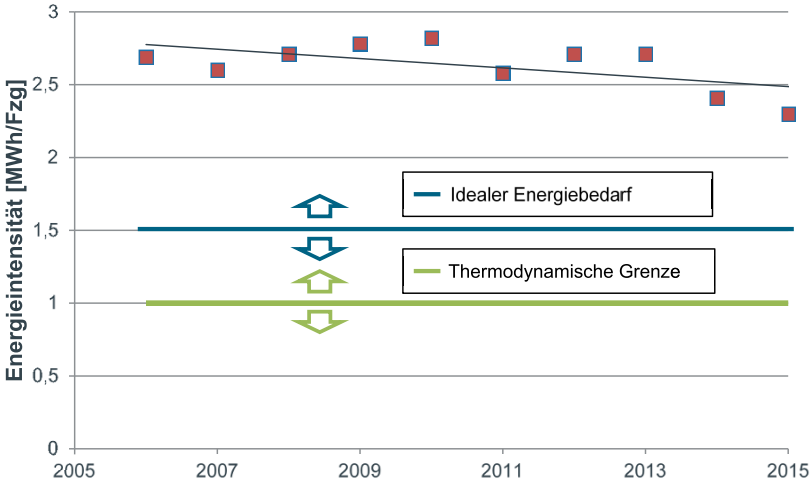

Abbildung 3: Entwicklung der Energieintensität der europäischen Automobilhersteller (vgl. ACEA European Automobile Manufacturers Association 2016)

Bei komplexen Fertigungssystemen mit einer Vielzahl von verschiedenen Prozessschritten wie sie im Automobilbau vorhanden sind, stellt die Identifikation einer thermodynamischen Grenze allerdings eine weitaus größere Herausforderung als bei Schmelzprozessen dar. Somit ist die Entfernung zur Effizienzgrenze noch unklar, da die thermodynamische Grenze nicht bekannt ist. Hier ist es allerdings möglich, über den Vergleich ähnlicher Standorte zu energetischen Benchmarks zu gelangen und einen idealen Energiebedarf zu ermitteln. Zusätzlich zu den Anforderungen aus Politik und Wirtschaft gibt es auch ein Kundeninteresse an einer Reduzierung des Energiebedarfs und somit der Treibhausgasemissionen in der Herstellung von Automobilen. Dies ist erkennbar an der Tatsache, dass Kaufentscheidungen immer stärker von Nachhaltigkeitsaspekten beeinflusst werden (Neuhold et al. 2013, S. 24–28). Dies ist von besonderer Relevanz, da durch die Einführung von Elektrofahrzeugen eine Verlagerung der Umweltbelastung von der Nutzungs- auf die Produktionsphase angenommen wird (Althaus und Gauch 2010, S. 35). Dies fällt insbesondere bei dem Betrieb der Automobile mit erneuerbarer elektrischer Energie ins Gewicht. Somit bietet die Ausrichtung auf eine energieeffiziente Produktion neben ökologischen, auch ökonomische Vorteile als Instrument zur Differenzierung gegenüber anderen Marktteilnehmern. Insbesondere Automobilunternehmen stehen in einem starken Wettbewerb. So drängen vermehrt koreanische aber auch chinesische Marken in den europäischen und amerikanischen Markt bzw. sind bereits etabliert (Hüttenrauch und Baum 2008, S. 52). Neben der Differenzierung von anderen Herstellern durch eine energieeffizientere Produktion, steht vor allem eine Senkung der Produktionskosten im Fokus der Automobilhersteller. Um dies zu