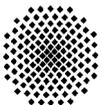
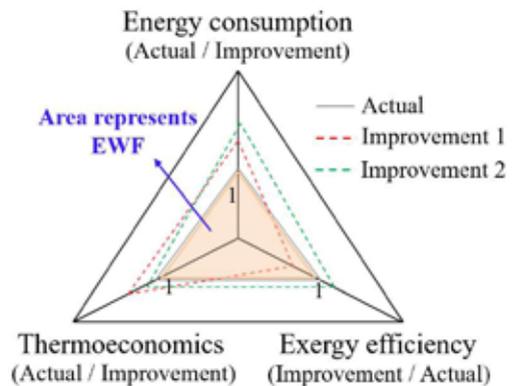
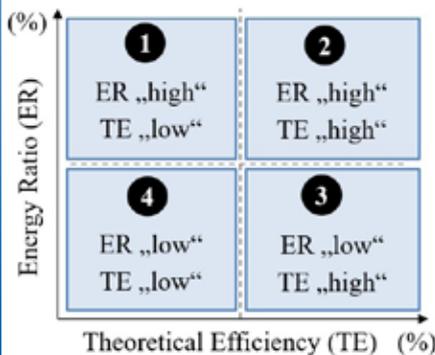


*Kamran Taheri*

## ***Energy and Resource Efficiency in Industrial Manufacturing Using an Integrated Exergy, Energy and Economic Method***

***Energie- und Ressourceneffizienz in der industriellen Produktion durch Anwendung einer integrierten Exergie-, Energie- und Ökonomiemethode***



# **Energy and Resource Efficiency in Industrial Manufacturing Using an Integrated Exergy, Energy and Economic Method**

Energie-und Ressourceneffizienz in der industriellen  
Produktion durch Anwendung einer integrierten  
Exergie-, Energie- und Ökonomiemethode

Von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing  
Engineering GSaME der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**Kamran Taheri**

aus Teheran

Hauptberichter: o. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. mult. Rainer Gadow  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer  
Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Mitschang

Tag der mündlichen Prüfung: 25.07.2017

Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile der Universität  
Stuttgart 2017



Forschungsberichte des Instituts für  
Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB)

**Kamran Taheri**

**Energy and Resource Efficiency in  
Industrial Manufacturing Using an Integrated Exergy,  
Energy and Economic Method**

Energie- und Ressourceneffizienz in der industriellen  
Produktion durch Anwendung einer integrierten  
Exergie-, Energie- und Ökonomiemethode

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5915-1

ISSN 1610-4803

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Acknowledgments

This dissertation has been accomplished during my employment at Institute for Manufacturing Technologies of Ceramic Components and Composites at University of Stuttgart under the financial support of GSaME and HBS.

First of all, I would like to thank o. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. mult. Rainer Gadow for his generous and scientific supports and for his trust on my ability which made the accomplishment of this work possible. Furthermore, I would like to thank Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer for his willingness to accept my work as a PhD thesis and for his supervision.

I am extremely gratified to all my colleagues for the friendly assistances, and especially to the Dr. -Ing. Martin Wenzelburger, Dr. -Ing. Venancio Martínez García, Dipl.-Ing. Martin Plachetta, M.Sc. Phuong Vu and M.Sc. Eng. Mohamed Abdelhalim El-horiny.

Also I would like to thank Mr. Harald Lang from MAHLE Behr GmbH & Co. KG and Mr. Süleyman Akseven from the Arburg GmbH & Co KG for their support and collaboration of doing my experiments.

Last but not least, I am very grateful to my parents for their unforgettable and unlimited supports and very special thanks to my mother for her encouragement throughout my study and career abroad. This thesis is dedicated to my parents and my grandparents, without their helps I certainly could not reach to this chapter of my life and this work would absolutely not have existed.

Stuttgart, 2017

Kamran Taheri



## Zusammenfassung

Nachhaltigkeitsaspekte und insbesondere zunehmende Knappheit und Kosten der Ressourcen sind heute die treibende Kraft hinter der Entwicklung von Wertschöpfungsprozessen. Gleichzeitig gilt es, den CO<sub>2</sub>-Ausstoss deutlich zu senken, um weiteren Klimaveränderungen entgegen zu wirken. Dies führt bei immer mehr Unternehmen zu der Einsicht, Energie- und Ressourceneffizienz sowie Ökonomie und Ökologie bei der Gestaltung von industriellen Prozessen gleichermaßen betrachten zu müssen (Neugebauer, 2008), (Müller, et al., 2009). Es gilt daher, entsprechende Methoden zur ganzheitlichen Betrachtung der Prozesse hinsichtlich der obengenannten Kriterien zu entwickeln und anzuwenden. In diesem Zug wurden die thermodynamischen Methoden als geeigneter Ansatz vorgestellt (Bejan, et al., 1996), (Bakshi, et al., 2011).

Die beiden Hauptsätze der Thermodynamik ermöglichen eine systematische, begründete Analyse von Prozessen der Energie- und Stoffwandlung hinsichtlich Technik, Ökologie und Wirtschaftlichkeit, die zwei Zielstellungen verfolgt: Zum einen dient die thermodynamische Analyse zur Auslegung und Optimierung der Systemkomponenten durch Identifikation und Lokalisierung der Verluste in einem Prozess. Zum anderen soll durch diese Betrachtung aus der Vielzahl möglicher Prozessvarianten der Verfahrenstechnik ein für den konkreten Anwendungsfall günstiger Prozessablauf ausgewählt werden.

Die wissenschaftliche Aufgabenstellung wurde im Verlauf der Bearbeitung insbesondere auf den Aspekt der Untersuchung von Effizienzkriterien eingeschränkt, wobei die thermodynamische Analyse von Prozessen als Ansatz zur Ermittlung der Effizienz eines Systems ausgewählt wurde. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die letztgenannte Zielstellung, durch eine detaillierte Analyse die Unzulänglichkeiten der untersuchten Prozesse im Hinblick auf Energiequantität sowie Energiequalität herauszuarbeiten. Abbildung 1 zeigt die Energieverluste und die entsprechenden Ursachen, die mit einem Prozess verbunden sind. In diesem Zusammenhang werden verschiedene thermodynamische Kennwerte definiert, welche die Abweichung des tatsächlichen Energieverbrauchs eines Prozesses von den idealen oder reversiblen Zuständen identifizieren. Energetische Methoden, die auf dem ersten Hauptsatz basieren, werden zur Bewertung die Energiequantität benutzt. Die Energiequalität wird durch die Zustandsgrößen Entropie (zweiter Hauptsatz) und Exergie betrachtet. Die exergetischen Bewertungsansätze verbinden die Aussagen der beiden Hauptsätze. Exergie ist als die reversible Arbeit oder Nutzarbeit definiert, die ein System maximal leisten kann bzw. der minimale Ressourcenaufwand (Szargut, et al., 1988), (Moran, et al., 2007), (Cengel, et al., 2006).

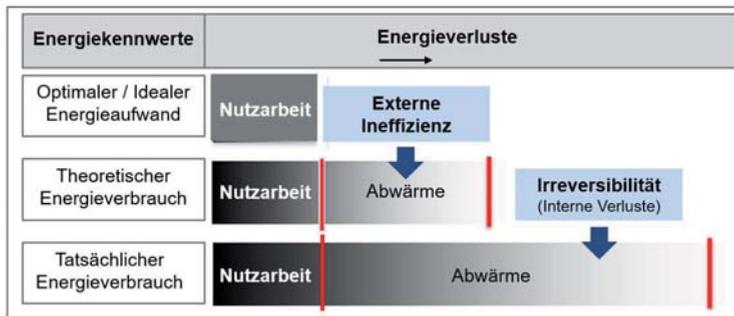


Abbildung 1 Energieverluste im Zusammenhang mit Energieumwandlungen in Fertigungsprozessen (ScheiHING, 2004)

Maßnahmen auf Prozess- und Prozesskomponenten-Ebene sind die ersten wichtigen Schritte zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Eine integrierte Bewertungsmethode durch Exergie- und Energieanalyse ergibt eine ganzheitliche Bilanzierung jedes Einzelprozesses in der Produktion als Basis für Energie- und Stoffwandlungsoptimierungen. Darüber hinaus scheint die thermodynamische Exergie geeignet, um die Kosten von Energiequantitäts- und Energiequalitätsverlusten im Zusammenhang mit den Investitionskosten abzubilden. Aus der ökologischen Perspektive der Ressourcennutzung ist die Exergieanalyse ein leistungsfähiges Werkzeug für die Bewertung der kumulierten Energieaufwände im Lebenszyklus der Stoff- und Energieströme. Zu diesem Zweck werden die Exergie und die Exergie-Ökonomie (Thermoökonomie) als geeignete Analysewerkzeuge für die Bewertung der Prozesskomponenten betrachtet. Aufgrund der komplexen thermodynamischen Vorgänge wurden diese bisher selten zur Optimierung der industriellen Fertigungsprozesse angewandt. Darüber hinaus besteht ein starker Bedarf an einem Energieeffizienzmodell, um Exergiekonzept und Thermoökonomie mit konventioneller Energieanalyse zu vereinen und mögliche Zielkonflikte zwischen verschiedenen Analysedimensionen zu eliminieren.

In den bisherigen Arbeiten, die schon eine integrierte Exergie- und Energiemethode benutzten, wurde Thermoökonomie als ein wichtiges Kriterium zur Integration in einem Exergie-basierten Analyseansatz vorgeschlagen (Frazier, 2006), (Jentsch, 2010). Neben dem Energieerhaltungssatz kommt bei der Betrachtung ökonomischer Prozesse dem zweiten Hauptsatz eine besondere Bedeutung zu, da sich mit dem Entropiegesetz ein ökonomischer Wertbegriff ableiten lässt (Bejan, et al., 1996), (Moran, et al., 2007). Hierfür wird in dieser Arbeit eine neue multidimensionale Analyseverfahren, die Exergie-Gewichtungsmethode (Exergy Weighting Method, EWM) entwickelt, um die Grenzen der bestehenden Methoden zu überwinden. Die entwickelte integrierte Methode vereinfacht einerseits die Anwendung des Exergiekonzepts in der Praxis und ist andererseits eine wirksame Methode auf der Prozesskomponentenebene zur Ermittlung und Priorisierung der vielversprechendsten Optimierungsmaßnahmen durch eine integrierte Betrachtung der Material- und

Energieumwandlungseffizienz sowie der ökologischen und ökonomischen Kriterien. Die Bausteine der Bewertungsmethode und ihre Vorteile sind in Abbildung 2 dargestellt.

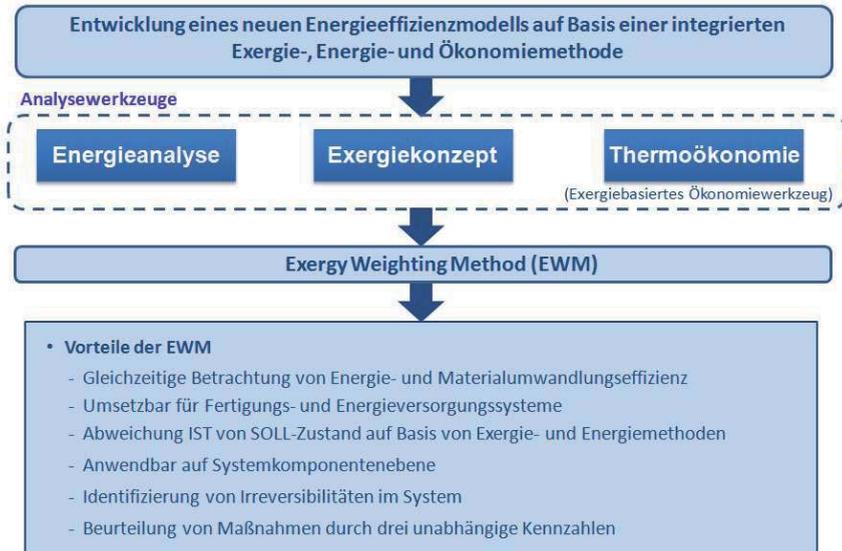


Abbildung 2 Zielsetzung der Arbeit

Der Ansatz und seine Bewertungsphasen von EWM sind in Abbildung 3 dargestellt. Die EWM besteht aus drei Hauptanalysephasen. Zuerst werden die kritischen Parameter und die Verluste durch die umfassende Energie- und Exergiebilanzierung identifiziert. Dann werden mögliche Verbesserungsmaßnahmen durch die entwickelte Matrix des Energieverhältnisses (EV) und der theoretischen/ Task Effizienz (TE) ausgewertet. Anschließend wird der Exergie-Gewichtungsfaktor (Exergy Weighting Factor, EWF) als ein ganzheitlicher Bewertungsindex auf Basis der integrierten Exergie-, Energie- und Thermoökonomieanalysewerkzeuge für den Vergleich der Optimierungsmaßnahmen nach dem eingeführten Ansatz von Thiede (Thiede, 2012) bestimmt. Für die flexible industrielle Anwendung wurde ein Softwaretool zur Bewertung des EWF-Indexes und seiner Kennzahlen entwickelt.

### Schritt 1 Prozessbilanzierung

- Energie- und Massenbilanzierung
- Entropiebilanzierung
- Exergiebilanzierung

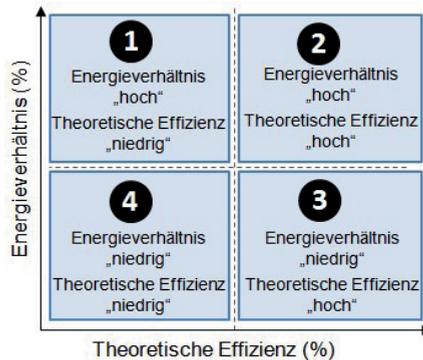
### Klassifizierung der Verluste

- Irreversibilität (Entropieerzeugung)
- Externe Ineffizienz

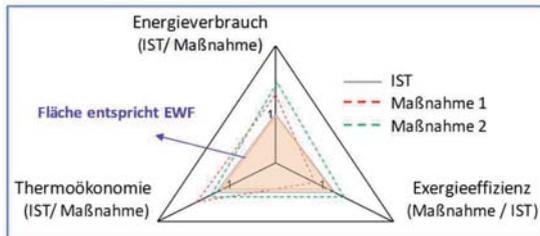
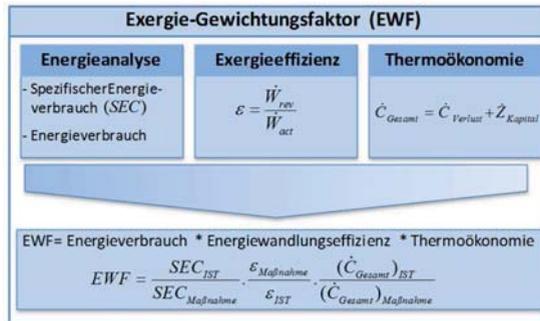
### Schritt 2 Beurteilung der Verbesserungsmaßnahmen



- 1 Hohe Verluste durch die Irreversibilität innerhalb des Systems
- 2 Aus thermodynamischer Sicht gut geeignet
- 3 Verluste durch externe Ineffizienz sind höher als durch Irreversibilität (z.B. Design)
- 4 Aus thermodynamischer Sicht aufgrund von externen und irreversiblen Verlusten ungeeignet



### Schritt 3 Vergleich der Optimierungsmaßnahmen und Bestimmung der besten Maßnahme



EWF

<b>Actual</b>			
Flow rate	2.5 kg/s	Energy_reversible	47.5 kW
Enthalpy_1	202 kJ/kg	Entropy rate	0.025 kW/K
Entropy_1	1.15 kJ/kg.K	Energy cost	0.15 €/kWh
Enthalpy_2	221 kJ/kg	Investment cost rate	2.6 €/h
Entropy_2	1.16 kJ/kg.K	Exergy loss cost rate	1.1175 €/h
<b>Improvement scenario</b>			
Flow rate	2.34 kg/s	Energy_reversible	30.42 kW
Enthalpy_1	202 kJ/kg	Entropy rate	0.936 kW/K
Entropy_1	1.15 kJ/kg.K	Energy cost	0.15 €/kWh
Enthalpy_2	215 kJ/kg	Investment cost rate	3.1 €/h
Entropy_2	1.55 kJ/kg.K	Exergy loss cost rate	41.8392 €/h
<b>Reference environment</b>			
T0	298 K	p0	1 bar
<b>EWF-Analysis</b>			
	<b>Actual</b>	<b>Improvement</b>	<b>Relative value</b>
Energy consumption	45 kW	39 kW	1.15385
Exergy efficiency	1.05556 %	0.78 %	0.738944
Total cost rate	3.7175 €/h	44.4392 €/h	0.083653
<b>Energy saving</b>		<b>Exergy Weighting Factor (EWF)</b>	
13.3333 %		EWF 0.071325	

Abbildung 3 Ansatz der Exergie weighting method (EWM)

Da die Anwendung der Exergieanalyse eine anspruchsvolle thermodynamische Analyse erfordert, wird die ExerCom-Software für die Bilanzierung angewendet, um die Analyse zu

erleichtern. ExerCom ist ein Softwaretool von Jacobs Engineering Inc. aus den Niederlanden, das die Exergie für einzelne Prozessströme bestimmt.

Die Vorteile der EWM gegenüber anderen Analysemethoden zur Beseitigung der Zielkonflikte zwischen den integrierten Analysewerkzeugen wurden in verschiedenen industriellen Fertigungs- und Energieerzeugungssystemen validiert und diskutiert.

In diesem Zusammenhang wurden eine detaillierte thermodynamische Analyse für Energie- und Materialumwandlungswirkungsgrad bei den Fertigungsprozessen thermisches Spritzen und Spritzgießen durchgeführt. Darüber hinaus wurden eine ganzheitlichen Analyse sowohl zur Auslegung und zum Ersatz von Komponenten einer Kälteanlage als auch zum Vergleich unterschiedlichen Optimierungsmaßnahmen eines Druckluftsystems zur Reduzierung des Energieverbrauchs und einer effizienten Wärmerückgewinnung untersucht. Auf Grundlage der Analyseergebnisse wurde eine erste Einschätzung der wirtschaftlichen Effekte vorgenommen, welche signifikante Einsparpotenziale bei den Betriebskosten deutlich machte. Es wurde festgestellt, dass bei den Fertigungsprozessen aufgrund des hohen Einflusses der Materialkosten auf die Gesamtproduktionskosten eine zusätzliche Materialkostenanalyse erforderlich ist.

In dieser Arbeit wurde die vorgestellte EWM-Methode für die Optimierung individueller Prozesse angewendet. Allerdings müssen alle Prozesse im Verfahren und ihre Relationen untereinander berücksichtigt werden. Üblicherweise wird durch die Steigerung der Energieeffizienz eines Prozesses die verbundenen Systeme und Prozesse beeinflussen. Hierzu kann die EWM mit anderen Energieeffizienzmethoden, beispielsweise der Energiewertstromanalyse, integriert werden. Für einen solchen Ansatz wird die gleiche Funktionseinheit zur Untersuchung der Prozesskette verwendet. Dies geht allerdings über den Rahmen dieser Arbeit hinaus und ist ein wichtiger Bereich für zukünftige Forschungen.

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1	Introduction .....	1
1.2	Problem definition.....	2
1.3	Objective.....	4
1.4	Approach.....	4
<b>2</b>	<b>Energy and resources efficiency in the industry .....</b>	<b>7</b>
2.1	Energy and material consumption in the industry .....	7
2.2	Energy efficiency in manufacturing systems/ processes.....	10
2.2.1	Increase of energy efficiency .....	12
2.2.2	Dealing with the heat losses.....	12
<b>3</b>	<b>State of science and technology .....</b>	<b>15</b>
3.1	Role of thermodynamics in energy and resources efficiency .....	15
3.2	System Boundary.....	18
3.3	Energy analysis.....	19
3.4	Exergy analysis.....	21
3.4.1	Second law of thermodynamics .....	21
3.4.2	Entropy concept.....	22
3.4.3	Exergy concept.....	23
3.4.4	Internal and external exergy losses.....	31
3.4.5	Exergy balance for closed and open systems .....	34
3.4.6	Performance criteria for exergy analysis.....	36
3.4.6.1	Simple exergy efficiency or task efficiency .....	37
3.4.6.2	Rational efficiency .....	38
3.4.6.3	Resource conversion efficiency (Degree of perfection).....	40
3.4.7	Thermoeconomics.....	44
<b>4</b>	<b>Methodology and Analysis Framework .....</b>	<b>49</b>
4.1	State of research.....	49
4.2	Concept development.....	51

4.2.1	Strategy for energy efficiency .....	55
4.2.2	Process energy and exergy balances.....	55
4.2.3	Evaluation of the improvement scenarios .....	57
4.2.4	Exergy Weighting Factor .....	59
<b>5</b>	<b>Applications and case studies .....</b>	<b>63</b>
5.1	Thermal spraying process.....	68
5.1.1	Process modeling.....	68
5.1.2	Evaluation of the improvement scenarios .....	75
5.1.2.1	Comparison of powder and suspension thermal spraying processes .....	75
5.1.2.1.1	Energy balance.....	76
5.1.2.1.2	Exergy analysis .....	78
5.1.2.1.3	Thermoeconomics .....	85
5.1.2.2	Comparison of the improvement scenarios.....	86
5.2	Refrigeration system .....	92
5.2.1	Process modeling.....	92
5.2.2	Evaluation of the improvement scenarios .....	94
5.2.2.1	Energy balance.....	96
5.2.2.2	Exergy analysis .....	99
5.2.2.3	Thermoeconomics.....	101
5.2.3	Comparison of the improvement scenarios.....	103
5.3	Compressed air system.....	107
5.3.1	Process modeling.....	108
5.3.2	Evaluation of the improvement scenarios .....	114
5.3.2.1	Energy analysis.....	115
5.3.2.2	Exergy analysis .....	116
5.3.2.3	Thermoeconomics.....	120
5.3.3	Comparison of the improvement scenarios.....	121
5.4	Injection Molding .....	124
5.4.1	Process modeling.....	125
5.4.2	Evaluation of the improvement scenarios .....	128

5.4.2.1	Energy analysis .....	128
5.4.2.2	Exergy analysis .....	129
5.4.2.3	Thermoeconomics.....	130
5.4.3	Comparison of the improvement scenarios.....	130
<b>6</b>	<b>Conclusions and outlooks.....</b>	<b>135</b>
	<b>List of symbols.....</b>	<b>141</b>
	<b>References .....</b>	<b>143</b>
	<b>Appendix .....</b>	<b>153</b>