

290

Fertigungstechnik - Erlangen

Der Mindestenergiebedarf zur Bewertung d. Energieeffizienz

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Sven Kreitlein

290

Kreitlein

Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion

ISSN 1431-6226
ISBN 978-3-87525-415-0

 **Meisenbach**
GmbH Verlag

Sven Kreitlein

*Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur
Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion*

Sven Kreitlein

*Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als
Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der
Produktion*

Bericht aus dem Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

FAPS



Meisenbach

G m b H V e r l a g

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

ISSN 1431-6226

ISBN 978-3-87525-415-0

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfällen -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2016

Herstellung: inprint GmbH, Erlangen

Printed in Germany

Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Sven Kreitlein
aus Bad Windsheim

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:	06.10.2016
Vorsitzender des Promotionsorgans:	Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr. rer. pol. Kai-Ingo Voigt

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein Dank gilt insbesondere dem Leiter dieses Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke für die Möglichkeit der Promotion, das stets entgegengebrachte Vertrauen sowie die konstruktiven Diskussionen und die wissenschaftlichen Freiräume, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Des Weiteren geht mein Dank an den Gründer des Lehrstuhls FAPS, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie Herrn Prof. Dr. rer. pol. Kai-Ingo Voigt und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl für die Übernahme des Koreferats bzw. der Mitgliedschaft im Prüfungskollegium.

Ein sehr großer Dank gilt all meinen Kolleginnen und Kollegen für die gute Zusammenarbeit, die fachlichen Diskussionen sowie die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre. Ferner bedanke ich mich bei allen Studierenden, die mich während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl unterstützt haben und somit einen wichtigen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die mich stets gefördert, mir Rückhalt und Verständnis entgegengebracht und somit maßgeblich zur Erreichung meiner Ziele beigetragen haben.

Nürnberg, im Oktober 2016

Sven Kreitlein

Inhaltsverzeichnis

1	Energieeffizienzsteigerung in der Produktion	1
1.1	Situation und Herausforderungen der Energieversorgung.....	1
1.2	Der grundlegende Bedarf die Energieeffizienz zu steigern	2
1.3	Erfolgspotenziale durch die Bewertung der Energieeffizienz.....	3
1.4	Bilanzraum und Systemgrenzen zur Bewertung der Energieeffizienz auf Basis des Mindestenergiebedarfs	5
2	Die Bewertung der Energieeffizienz als treibendes Instrument zur Steigerung des Unternehmenserfolgs	7
2.1	Bedeutung und Bedarf eines einheitlichen Bewertungssystems der Energieeffizienz für Unternehmen	7
2.2	Die Begriffe Energie und Energieeffizienz als Grundbausteine für Energieeffizienzbewertungssysteme	11
2.3	Kennzahlen als Maßgröße zur Unternehmenssteuerung	14
2.4	Energiekenngrößen als kennzahlenbasierte Maßeinheiten zur quantitativen Darstellung der Energieeffizienz.....	16
2.5	Benchmarking als Instrument zur Erfolgssteigerung.....	23
2.6	Energie-Benchmarking als erweitertes Instrument zur Energieeffizienzbewertung und Erfolgssteigerung.....	24
3	Analyse und Erweiterung gültiger Kennzahlen und Methoden für die Energieeffizienzbewertung	26
3.1	Anforderungskriterien zur einheitlichen, übergreifenden und expressiven Bewertung der Energieeffizienz	26
3.2	Die unzureichende Fähigkeit bestehende Kennzahlen und Methoden zur Energieeffizienzbewertung einzusetzen	33
3.3	Neukonzeptionierung und Erweiterung bestehender Kennzahlen als Instrument zur Energieeffizienzbewertung	35

3.4	Überblick der Fähigkeitsanalyse bestehende Kennzahlen und Methoden zur Energieeffizienzbewertung einzusetzen	38
4	Der Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz	39
4.1	Grundlagen zur energetischen Beschreibung eines Systems	39
4.2	Modellvorstellung und Rahmenbedingungen zur Beschreibung der Existenz eines Mindestenergiebedarfs	41
4.3	Modellvorstellungen des Mindestsystemenergieänderungsbedarfs als Referenzwert auf mikroskopischer Ebene	44
4.3.1	Das chemische Modell zur Mindestenergiebedarfsbestimmung	45
4.3.2	Das atomphysikalische Modell zur Mindestenergiebedarfsbestimmung	45
4.3.3	Das thermodynamische Modell zur Mindestenergiebedarfsbestimmung	48
4.3.4	Das werkstoffwissenschaftliche Modell zur Mindestenergiebedarfsbestimmung	49
4.4	Gültigkeitsbereich der Werkstoffe	52
4.4.1	Metall	52
4.4.2	Kunststoff	52
4.4.3	Glas und Keramik	53
5	Übertragung des Modells des Mindestenergiebedarfs von der atomaren auf die makroskopische Ebene.....	55
5.1	Eigenschaften makroskopisch eingesetzter Werkstoffe.....	55
5.2	Herleitung makroskopischer Werkstoffkenngrößen zur Ermittlung des Mindestenergiebedarfs auf Basis der mikroskopischen Modellvorstellungen.....	56
5.2.1	Herleitung des Mindestenergiebedarfs für chemische Verfahren auf Basis der Aktivierungsenergie.....	56

5.2.2	Herleitung des Mindestenergiebedarfs für thermische Prozesse auf Basis der spezifischen Wärmekapazität.....	57
5.2.3	Herleitung des Mindestenergiebedarfs für Trennvorgänge auf Basis der Bruchfestigkeit.....	58
5.2.4	Herleitung des Mindestenergiebedarfs für die Verformung von Metallen auf Basis der kritischen Schubspannung.....	59
5.3	Ableitung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs als Referenzwert auf makroskopischer Ebene	61
5.4	Logische Begründung für die Bestimmbarkeit des Mindestenergiebedarfs auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten	66
6	Der Mindestenergiebedarf als Referenz zur Energieeffizienzbewertung von Fertigungsverfahren der DIN 8580	69
6.1	Übersicht der Grundoperationen zur energetischen Beschreibung von Fertigungsverfahren der DIN 8580.....	69
6.2	Bestimmung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs für Fertigungsverfahren der DIN 8580	73
6.3	Grundoperationen zur Ermittlung der Mindestenergiebedarfe für die Fertigungsverfahren der DIN 8580	76
6.3.1	Urformen	77
6.3.2	Umformen	79
6.3.3	Trennen.....	80
6.3.4	Fügen.....	81
6.3.5	Beschichten	83
6.3.6	Stoffeigenschaften ändern	84
7	Umsetzung der Mindestenergiebedarfsermittlung als Basis zur Energieeffizienzbewertung in der Produktion	85
7.1	Systematische Ableitung der Mindestenergiebedarfsermittlung zur Energieeffizienzbewertung von Produktionsprozessen	85
7.2	Vorgehen zur Berechnung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs in Folge der Fertigungsparameter	88

7.3	Darstellung der Berechnung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs an einem Beispielbauteil.....	90
8	Die Kenngröße Relative Energieeffizienz zur Bewertung der Produktion..	92
8.1	Betrachtungsebenen und Bewertungsobjekte der Produktion	92
8.2	Definition der Formen des Energieeinsatzes in der Produktion	94
8.3	Modalitäten der Erfassung des tatsächlichen Energieverbrauchs in der Produktion.....	100
8.4	Definition der Kennzahl Relative Energieeffizienz (REE).....	104
8.5	Ermittlung und Anwendungsfelder der Kenngröße Relative Energieeffizienz zum Einsatz in produzierenden Unternehmen	107
9	Verifizierung und experimentelle Darstellung der Mindestenergiebedarfsbestimmung im Versuch	109
9.1	Verifizierung des Mindestenergiebedarfs und dessen Bestimmbarkeit auf Basis der Modellvorstellungen	109
9.1.1	Versuchsdurchführung und messtechnische Bestimmung der Biegearbeit als Vergleichsbasis für den E_{GM}	110
9.1.2	Berechnung des E_{GM} als festgelegte Bestimmung für die Grundoperation Biegen	112
9.1.3	Theoretische Bestimmung des E_{SM} auf atomarer Ebene für das atomphysikalische Modell	113
9.1.4	Gegenüberstellung der mikroskopischen und makroskopischen Ergebnisse zur Verifizierung des Mindestenergiebedarfs	115
9.1.5	Übertragung der Verifikationssystematik auf die weiteren Modellvorstellungen zur Mindestenergiebedarfsbestimmung	117
9.2	Experimentelle Darstellung der Mindestenergiebedarfsberechnung und REE-Ermittlung am Beispiel der GOP Biegen	120
9.2.1	Messtechnik zur Erfassung der Energieverbräuche zur Ermittlung der Relativen Energieeffizienz auf Prozessebene.....	120
9.2.2	DIN 8580 2.4.1 Biegeumformen mit geradliniger Werkzeugbewegung	121

9.2.3	DIN 8580 4.5.1 Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper ..	124
9.2.4	Diskussion der Versuchsergebnisse aus Anwendersicht	128
10	Ermittlung der Relativen Energieeffizienz zur Bewertung von Produktionsstrukturen und Produkten	129
10.1	Das Vorgehen zur übergreifenden Bewertung von Unternehmens- und Produktionsstrukturen	129
10.1.1	Ermittlung der REE zur Prozessbewertung	130
10.1.2	Ermittlung der REE zur Maschinen- und Anlagenbewertung	131
10.1.3	Ermittlung der REE zur Werksbewertung	134
10.1.4	Ermittlung der REE zur Unternehmensbewertung	137
10.1.5	Ermittlung der REE zur Branchenbewertung	138
10.2	Das Vorgehen zur Bewertung eines Produkts hinsichtlich seiner energieeffizienten Herstellung	138
11	Evaluation und Implementierung der Energieeffizienzbewertung auf Basis des Mindestenergiebedarfs	143
11.1	Vergleich von Energiekenngrößen nach den Anforderungen an eine Methode zur Bewertung der Energieeffizienz	143
11.2	Aussagekraft der Relativen Energieeffizienz auf Basis des Mindestenergiebedarfs als Bewertungsreferenzwert	146
11.3	Herausforderungen bei der Anwendung	147
11.4	Ausblick zur flächendeckenden Anwendung der REE zur Bewertung der Energieeffizienz im Unternehmen	148
12	Zusammenfassung	152
13	Summary	154
14	Abkürzungsverzeichnis	156
15	Formelwerteverzeichnis	158
16	Literaturverzeichnis	160
17	Anhang	176

1 Energieeffizienzsteigerung in der Produktion

1.1 Situation und Herausforderungen der Energieversorgung

Vor dem Hintergrund des bis zum Jahr 2022 zu vollziehenden Ausstiegs Deutschlands aus der Kernenergie sieht sich das Land einer immer weiter aufklaffenden Versorgungslücke gegenüber [116]. Zudem haben in den letzten Jahren steigende Energiepreise zu veränderten Rahmenbedingungen in der Produktion geführt [28] [214]. Mit dem damit verbundenen Wachstum des Energiekostenanteils steigt zudem das Bewusstsein, dass die Optimierung des Energieeinsatzes einen Beitrag zur Kostensenkung und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit leisten kann [21] [43]. Die Rohstoffverknappung, die Reduzierung von Treibhausgasemissionen und die damit verbundene Umstellung auf erneuerbare Energien werden diesen Trend in den folgenden Jahren noch verstärken [83].

Produzierende Unternehmen sehen sich daher zunehmend in einem Spannungsfeld zwischen Energie und Klima. Gerade energieintensive Branchen benötigen neue Ansätze, um durch eine energieeffizientere Produktion den steigenden Kosten zu begegnen. Die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens ist demzufolge zunehmend von den Energiepreisen abhängig [60]. Gerade für das deutsche produzierende Gewerbe, das mehr als 25 % des in Deutschland insgesamt benötigten Endenergiebedarfs verbraucht, wird die Energieeffizienz in der Produktion mehr und mehr zu einem strategisch wichtigen Thema [33]. Insgesamt schätzen die Betriebe des verarbeitenden Gewerbes ihr Energieeinsparpotenzial in der Produktion auf 15 % [77] [203].

Der Energieverbrauch muss demnach optimiert werden. Dies ist aber nur zu realisieren, wenn die Details der Kostenentstehung, des Verbrauchs und der Wirksamkeit von Einsparmaßnahmen bekannt sind. Demzufolge stellt eine umfassende Transparenz die Voraussetzung für die Energieeffizienz dar. Durch konsequente Energieeinsparmaßnahmen in allen Bereichen kann ein wesentlicher Beitrag zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit, während und nach der Energiewende, geleistet werden. Vor dem Hintergrund der beschriebenen Entwicklungen gewinnt die Thematik der Energieeffizienz stetig an Bedeutung.

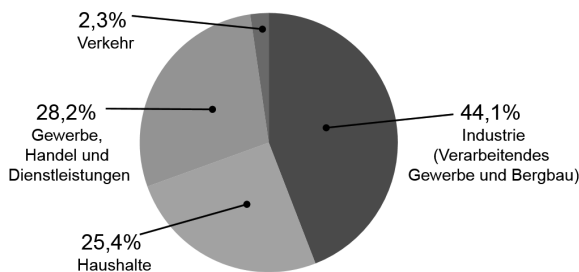


Abbildung 1: Stromverbrauch in Deutschland nach Endenergiesektoren 2014 [7]

Wie die Energiebilanz des Stromverbrauchs nach Endenergiesektoren für das Jahr 2014 in Abbildung 1 aufzeigt, verursachen private Haushalte gut ein Viertel des Gesamtverbrauchs elektrischer Energie in Deutschland, die Industrie, vor allem das verarbeitende Gewerbe, sogar noch mehr (28,2%). Im Vergleich zum Vorjahr lag der anteilige Stromverbrauch der Industrie 2013 ebenfalls über 40% [6]. Hieraus ergibt sich die Annahme, dass im verarbeitenden Gewerbe erfolgreich umgesetzte Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung über eine große Hebelwirkung verfügen [181].

Die Annahme bestätigt sich bei Betrachtung der wirtschaftlichen Einsparpotenziale von elektrischer Energie, die in Abbildung 2 gegenübergestellt sind. Mit etwa 50 TWh besitzt der Industriesektor in diesem Vergleich das größte Potenzial. Dieser Wert wurde im Rahmen eines Verbundprojekts unter Mitwirkung von Fraunhofer Instituten und weiteren Partnern ermittelt. Hierfür wurden insbesondere die technologischen Effizienzpotenziale quantifiziert, die dafür erforderlichen Investitionen und Einsparungen erhoben und in einem volkswirtschaftlichen Modell implementiert [186] [70] [71]. Aufgrund des höchsten ermittelten Energieeinsparpotenzials von elektrischer Energie im verarbeitenden Gewerbe, steht die Identifizierung von Potenzialen zur Steigerung der Energieeffizienz in diesem Bereich im Fokus dieser wissenschaftlichen Arbeit.

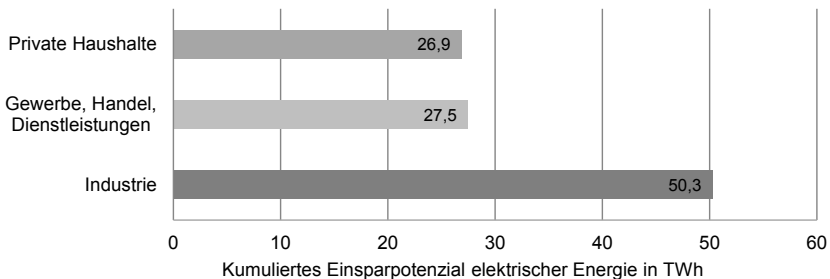


Abbildung 2: Kumulierte Einsparpotenziale elektrischer Energie in Deutschland bis 2025 nach Endenergiesektoren [70] [71]

1.2 Der grundlegende Bedarf die Energieeffizienz zu steigern

Zur Realisierung der Ziele für den Klima- und Umweltschutz sowie der daraus resultierenden vielfältigen volkswirtschaftlichen Auswirkungen, besteht dringender Handlungsbedarf zur nachhaltigen Senkung des Energieverbrauchs [116]. Um konkrete Optimierungspotenziale für produzierende Unternehmen zu identifizieren, bietet sich ein Vergleich der Energieeffizienz der Produktherstellung an. Für die maximale Ausschöpfung vorhandener Energieeinsparpotenziale muss gewährleistet sein, dass die Energieeffizienz über Produktgruppen hinweg und sogar unternehmens- und branchenübergreifend eindeutig bewertet, verglichen und beurteilt werden kann. Nur so lassen sich effiziente Produktionsstrukturen identifizieren, die als Vorbild und Referenz dienen

können. Zur Identifikation konkreter Energieeinsparpotenziale werden daher aussagekräftige Energiekennzahlen benötigt, die eine interne und unternehmensübergreifende Vergleichbarkeit von Prozessen als auch von Produkten ermöglichen. Ist eine übergreifende Vergleichbarkeit nicht gewährleistet, besteht die Gefahr von Fehlinterpretationen. Des Weiteren müssen solche Kennzahlen konkreten Aufschluss darüber geben, an welcher Stelle und in welcher Höhe ein tatsächliches Optimierungspotenzial zur Steigerung der Energieeffizienz vorhanden ist. Erst wenn das Potenzial eindeutig identifiziert und mittels Kennzahlen beschrieben werden kann, können greifende Maßnahmen konzipiert und deren Umsetzung gesteuert werden. Existierende Energiekennzahlen lassen jedoch keine übergreifenden Vergleiche zu, da die zum Einsatz kommenden Referenzwerte keine produkt- bzw. prozessunabhängigen Vergleichsbasen darstellen. Aufgrund fehlender Referenzwerte geben sie zudem keinen Aufschluss darüber, an welcher Stelle der Prozesskette und in welcher Höhe ein tatsächliches Einsparpotenzial vorliegt. Die wesentliche Herausforderung besteht demnach darin, eine Methode zur Energieeffizienzbewertung zu entwickeln, die eine solche unabhängige Vergleichsbasis definiert. Aufbauend auf der These, dass für jeden wertschöpfenden Prozess in der Stückgutfertigung prinzipiell ein theoretischer Mindestenergiebedarf ermittelt werden kann, können Kennwerte abgeleitet werden, die eine eindeutige Aussage über die Energieeffizienz eines wertschöpfenden Prozesses ermöglichen, indem sie den Grad der Energieeffizienz expressiv beschreiben. Die Ermittlung dieses Mindestenergiebedarfs als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz steht im Mittelpunkt dieser Arbeit.

1.3 Erfolgspotenziale durch die Bewertung der Energieeffizienz

Die Möglichkeit der aussagekräftigen Bewertung und des übergreifenden Vergleichs der Energieeffizienz birgt Potenziale zur Steigerung des Unternehmenserfolgs im Sinne einer Steigerung von Umsatz, Marktanteil und/oder Gewinn [237].

Durch den internen und den unternehmensübergreifenden Vergleich von Prozessen, Produkten, Anlagen, Werken, Standorten und gesamten Unternehmen, können im Hinblick auf die Energieeffizienz in der Produktion, Unterschiede offengelegt und energieeffiziente Produktionsstrukturen oder Unternehmensbereiche identifiziert werden, welche Hinweise auf Einsparpotenziale liefern. Insbesondere durch den übergreifenden Vergleich können detaillierte Untersuchungen vorhandener Differenzen zur Aufdeckung von Energieeinsparpotenzialen führen. Energieeffizienzkennzahlen ermöglichen eine eindeutige Analyse, indem sie komplexe energetische Zusammenhänge transparent darstellen. Werden daraus abgeleitete Maßnahmen sachgerecht umgesetzt, resultiert daraus eine gesteigerte Energieeffizienz durch die Senkung des Energieverbrauchs und den damit verbundenen Kosten. Die reduzierten Kosten der Leistungserstellung führen bei gleichbleibendem Angebotspreis zu einem höheren Deckungsbeitrag pro verkaufte Einheit oder zu niedrigeren Preisen mit absatzsteigernder Wirkung.

Darüber hinaus ergeben sich hierdurch strategische Möglichkeiten den Absatz und parallel das Unternehmensimage zu steigern [237]. Zusätzliche Absatzsteigerungen können sich aus der Nutzung der gesteigerten Nachhaltigkeit als Verkaufsargument ergeben [19] [186] [171]. Bei Betrachtung der Kriterien für den Kaufentscheidungsprozess deutscher Verbraucher, die im Rahmen einer Verbraucherbefragung im Jahr 2010 ermittelt wurden, wird deutlich, dass die Nachhaltigkeit als zweitwichtigstes Kriterium eine entscheidende Rolle im Kaufentscheidungsprozess der Konsumenten spielt (vgl. Abbildung 3) [141].

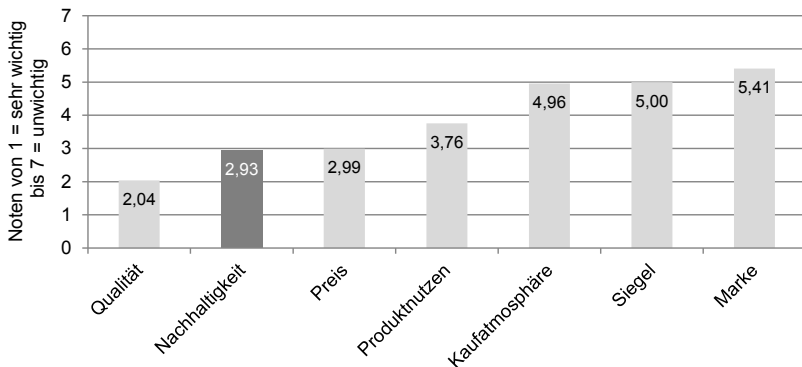


Abbildung 3: Kriterien für die Kaufentscheidung deutscher Verbraucher [141]

Aufgrund des steigenden Umweltbewusstseins der Bevölkerung [197] dienen gute Energieeffizienz-Benchmarks – im Sinne einer transparenten Kennzeichnung für nachhaltige Produktion – indirekt auch als Kaufanreiz für potentielle Kunden. Die geschickte Kommunikation eines solcherart erworbenen komparativen Vorteils verbessert nicht nur das Produktimage sondern steigert auch den Markenwert. Dadurch wächst das Image des gesamten Unternehmens. Hierdurch lassen sich höhere Preise durchsetzen und durch Neukundengewinnung Absatzmengen steigern.

Zur Steigerung des Unternehmenserfolgs, durch Erreichung dieser Ziele, wird im Rahmen dieser Arbeit die Kennzahl „Relative Energieeffizienz“ definiert. Diese Kennzahl vermag es die Energieeffizienz expressiv in Form einer quantifizierbaren Maßgröße darzustellen. Als Referenzwert für die Energieeffizienz dient dieser Kennzahl der Mindestenergiebedarf. Detailanalysen ermöglichen auf Basis eines übergreifenden Vergleichs Energieeinsparpotenziale zu detektieren. Dieses Vorgehen dient zur eigenen Leistungssteigerung, zur Durchführung eines Energiebenchmarks sowie zur Produktklassifizierung nach der energieeffizienten Herstellungsweise.

1.4 Bilanzraum und Systemgrenzen zur Bewertung der Energieeffizienz auf Basis des Mindestenergiebedarfs

Infolge der großen Hebelwirkung durch Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung, kommt dem verarbeitenden Gewerbe als wesentlichem Treiber des Energieverbrauchs eine wichtige Bedeutung zu. Innerhalb des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland weisen die Branchen Fahrzeugbau, Elektroindustrie, Ernährungs- und Tabakgewerbe, Handhabung von Gummi- und Kunststoffwaren sowie Metallherzeugung und -verarbeitung besonders hohe relative Einsparpotenziale bis zu über 20% auf [202]. In den genannten Industriezweigen stellen automatisierte Produktionsprozesse die vorherrschenden Produktionsverfahren dar. Auf deren Energieeffizienzbewertung richtet die im weiteren Verlauf dargestellte Bewertungsmethode ihr Hauptaugenmerk. Die Bewertung kann auf Basis der vorhandenen Fertigungszeichnung eines Stückgutes und dem Arbeitsplan erfolgen. Vor der Konstruktionsphase erforderliche Spezifikationen und deren Einfluss auf den Energieverbrauch bei der Produktherstellung, wie Produktfunktionalitäten, werden nicht berücksichtigt. Im Fokus steht die unmittelbare Energieeffizienzbewertung des Produktionsprozesses.

Die Methode zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz eignet sich generell für die Energieeffizienzbewertung wertschöpfender Produktionsprozesse in der Stückgutproduktion nach DIN 8580 [46]. Dies gilt insbesondere für automatisierte Fertigungsverfahren der Stückgutproduktion, unter der Voraussetzung, dass der tatsächliche Verbrauch der eingesetzten Endenergie für den Produktionszweck messbar ist. Erfasst werden können alle Formen der eingesetzten Endenergie, sofern deren Energiegehalt bestimmbar ist.

Dementsprechend stößt die Energieeffizienzbewertung auf Basis des Mindestenergiebedarfs in der Prozessindustrie nicht zwangsläufig an ihre Grenzen, war aber in der bisherigen Forschung kein Gegenstand welcher tiefergehend untersucht wurde.

Die Bewertungsmethode zielt darauf ab, Einflussfaktoren energieeffizienter Strukturen in der Stückgutproduktion erkennbar zu machen. Dienstleistungen sind dabei ausgeschlossen, ebenso sämtliche nicht messbar erbrachte Leistungs- und Energieformen durch Mensch und Tier. Bei Betrachtung von Abbildung 4 wird ersichtlich, dass über die Wertschöpfungskette hinweg neben der wertschöpfenden Primäraktivität der Produktion weitere Unterstützungsaktivitäten zur Herstellung eines Produkts unerlässlich sind. Der Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Energieeffizienzbewertung wird ausschließlich auf Basis wertschöpfender Prozesse der Produktion ermittelt.

Nicht-wertschöpfende Aktivitäten werden zur Ermittlung des Mindestenergiebedarfs nicht berücksichtigt, sie spiegeln sich in der Messung des tatsächlichen Energieverbrauchs wider. Die Primäraktivitäten der internen und externen Logistik, des Marketing und Verkaufs sowie des Services werden in diesem Zuge ebenfalls nicht betrachtet.

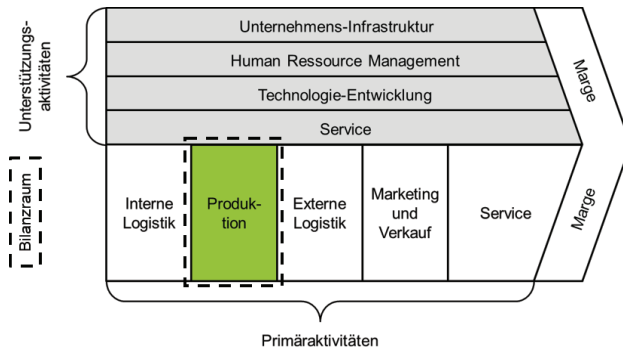


Abbildung 4: Wertschöpfungskette nach Porter [192]

Somit beschränken sich die Systemgrenzen auf alle zur Ausführung der Primäraktivität „Produktion“ erforderlichen Endenergiebedarfe. Dies umfasst den direkt zurechenbaren Endenergieeinsatz zur Herstellung eines Produkts, den Endenergieeinsatz zum Betrieb eines Produktionsbereichs sowie den direkt damit verbundenen Einrichtungen. Wertschöpfende, prozessspezifische Einflussfaktoren werden auf Basis allgemeingültiger physikalischer Zusammenhänge im Rahmen der Ermittlung des Mindestenergiebedarfs berücksichtigt. Die Ermittlung des Mindestenergiebedarfs als Referenzwert erfolgt unter Annahme idealer Bedingungen. Im Umfeld der Produktion werden objektunabhängige Umgebungskenngößen als Referenz für ideale Bedingungen durch den Normzustand¹ nach DIN 1343 [44] bei trockener Luft [15] definiert. In Bezug auf das zu verarbeitende Material in der Stückgutproduktion ist von idealer Qualität des Materials auszugehen. Die Qualität eines Materials wird beschrieben durch die Materialspezifikationen. Die Materialspezifikationen sind inhärente Merkmale eines Objekts, die bestimmte Anforderungen erfüllen. Diese Merkmale sind dargestellt durch einen Nennwert und den zugehörigen Toleranzbereich. Von ideal wird an dieser Stelle gesprochen, wenn das Merkmal genau den Zustand des Nennwertes vorweist [132] [55].

Die Hauptintention liegt darin, Produktionsprozesse eindeutig zu bewerten um Optimierungspotenziale aus fertigungstechnischer Sicht detektieren zu können. Nicht wertschöpfende Bereiche des Unternehmens außerhalb der Produktionsstätte werden nicht mit in die Energieeffizienzbewertung einbezogen.

Fremderzeugte Energieträger werden auf Basis ihres Endenergiegehalts berücksichtigt. Fremderzeugte Betriebs-, Roh- und Hilfsstoffe werden unter der Annahme berücksichtigt, dass der Endenergieeinsatz zu deren Erzeugung und Bereitstellung bekannt ist. Das gleiche gilt für Halb- und Fertigerzeugnisse die im Rahmen der eigenen Wertschöpfungskette weiterverarbeitet werden.

¹ Der Normzustand ist nach DIN 1343 derjenige Referenzzustand, der durch die Normtemperatur $T_n=273,15\text{ K}$ und den Normdruck $P_n=101325\text{ Pa}$ festgelegt ist.

2 Die Bewertung der Energieeffizienz als treibendes Instrument zur Steigerung des Unternehmenserfolgs

Innerhalb dieses Kapitels werden die Grundlagen zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion erläutert. Einleitend werden die Relevanz des Themas und der sich daraus ableitende Handlungsbedarf dargelegt. Anschließend werden wesentliche Begriffe wie Energieeffizienz, Energiekennzahlen sowie Benchmarking beschrieben. Darauf aufbauend wird das Konzept eines Energie-Benchmarkings dargestellt.

2.1 Bedeutung und Bedarf eines einheitlichen Bewertungssystems der Energieeffizienz für Unternehmen

Vor dem Hintergrund des Klimawandels, der Ressourcenknappheit und den dadurch bedingt steigenden Energiepreisen gewinnt Energieeffizienz in allen Lebensbereichen zunehmend an Bedeutung. Dem Endverbraucher steht bereits eine Reihe von Bewertungssystemen zur Verfügung, die den Energieverbrauch während des Gebrauchs des jeweiligen Produkts verdeutlichen. Darüber hinaus wurde mithilfe einer Unternehmensumfrage die Forderung nach einer einheitlichen Energieeffizienzbewertungsmethode detektiert. Hieraus leitet sich der Handlungsbedarf nach einem übergreifenden Vergleich der Energieeffizienz in der Produktion ab.

Heutige Bewertungssysteme und ihre Grenzen

Dem Endverbraucher wurde mit dem verpflichtenden EU-Energieverbrauchsetikett für diverse Produktgruppen, dem freiwilligen Kennzeichnungssystem EU Energy Star für energieeffiziente Bürogeräte [4] und der CO₂-Effizienzklasse für Pkw [2] bereits eine Reihe von Hilfsmitteln zur Kaufentscheidung an die Hand gegeben. Diese Systeme ermöglichen aufgrund einer hohen Transparenz einen einfachen, aber dennoch aussagekräftigen Vergleich von angebotenen Produkten innerhalb einer Produktgruppe hinsichtlich des Energieverbrauchs sowie des Schadstoffausstoßes. Dabei bezieht beispielsweise das EU-Energieverbrauchsetikett neben dem Energieverbrauch, auch die Größenklasse des Geräts mit in die Bewertung ein. Die Einordnung in eine der zehn Energieeffizienzklassen erfolgt durch Vergleich des tatsächlichen Verbrauchswertes mit dem festgelegten Referenzverbrauchswert, entsprechend der jeweiligen Größenklasse [169]. Stellvertretend für derzeitige Bewertungssysteme wird nachfolgend das EU-Energielabel detailliert beschrieben. Europaweit werden elektrische Haushaltsgroßgeräte wie Kühl- und Gefriergeräte, Geschirrspüler, Elektrobacköfen, Waschmaschinen, Fernsehgeräte, Haushaltslampen, Wäschetrockner oder Raumklimageräte einheitlich mit einem Energieverbrauchsetikett versehen. Dieses Etikett wird als EU-Energielabel bezeichnet und gibt Auskunft über den Energieverbrauch bei der Verwendung des Gerätes. Es bewertet diesen anhand einer Skala. Diese Skala, welche sich am Alphabet orientiert, ist in Abbildung 5 dargestellt. A+++ entspricht hier der

energieeffizientesten Klasse und D steht entsprechend für Geräte in der höchsten Verbrauchsgruppe. Rechts neben der Skala wird der Energieverbrauch des jeweiligen Produkts anhand einer Kennzeichnung bewertet, welche angibt in welchen Bereich das vorliegende Produkt fällt. Das EU-Energielabel soll dazu beitragen, die Konsumenten bei ihrer Kaufentscheidung zu unterstützen sowie der Industrie hierdurch einen Anreiz für die Entwicklung und Produktion energieeffizienter Produkte zu schaffen. [41] [173] Die Berechnung ist je Produktgruppe gleich und wird anhand des Energieverbrauchs sowie der wesentlichen Produktmerkmale (z.B. für Fernsehgeräte die sichtbare Bildschirmfläche) durchgeführt. Die mögliche Bandbreite des Energieeffizienzindex wird stufenweise den Energieeffizienzklassen zugeordnet.



Abbildung 5: EU-Energielabel [223]

Hierdurch kann das analysierte Produkt einer Energieeffizienzklasse zugewiesen werden [69]. Neben der produktgruppenübergreifenden Angabe der Energieeffizienzklasse (rechts oben) zeigt dieses zudem spezifische Angaben für diese Produktgruppe (unterer Teil des Labels). Diese sind z.B. die Bildschirmdiagonale sowie die Angabe, ob das Gerät mit einem echten Ausschalter ausgestattet ist [69]. Zur Beurteilung der Energieeffizienz bei der Produktherstellung kann das EU-Label, beziehungsweise dessen Berechnungssystematik, insbesondere wegen des reinen Bezugs auf den Energieverbrauch bei der Verwendung eines Produkts, nicht herangezogen werden. Jedoch wird eine Darstellungsform (Energieeffizienzklassen) verwendet, die obwohl die Berechnung je Gerätetyp verschieden ist, einheitlich über alle Produktgruppen angewandt wird. Es handelt sich dementsprechend um eine Bewertungsgrundlage, welche über Produktgruppen hinweg Gültigkeit aufweist. Neben dem EU-Energielabel wird noch eine Vielzahl an verbraucherorientierten Kennzeichnungen für energie- oder umweltfreundliche Produkte verwendet. Diese fokussieren, wie auch das EU-Energielabel nicht den Energieverbrauch bei der Produktherstellung. Beispiele hierfür sind [174]:

- der Blaue Engel,
- das TCO-Siegel,
- das EU-Ecolabel,
- das Energielabel für Heizungs- beziehungsweise Umwälzpumpen und
- der Energieausweis für Gebäude.

Die Forderung nach einheitlichen Energieeffizienzbewertungsmethoden aus Sicht produzierender Unternehmen

Die bereits existierenden Bewertungssysteme zur Energieeffizienz dienen dem Endverbraucher für eine Einordnung von Produkten hinsichtlich ihres Energieverbrauchs während der Anwendung. Jedoch gibt es bis dato kein Bewertungssystem für den Energieverbrauch bei der Produktherstellung. Anhand einer Unternehmensumfrage

wird der Frage nachgegangen, warum ein methodischer Ansatz zur übergreifenden Bewertung der energieeffizienten Herstellung von Produkten überhaupt sinnvoll sein könnte. Ziel der Unternehmensumfrage ist die Ermittlung der Sensibilisierung und die Ermittlung des Stands der Technik bezüglich der Energieeffizienz in der Produktion. Zudem wird durch die Umfrage reflektiert, welche Kennzahlen und methodischen Ansätze in der Industrie angewendet werden. Zusätzlich gibt die Auswertung Aufschluss darüber, inwiefern Lean und Six Sigma Methoden mit der Ermittlung und Bewertung der energieeffizienten Produktion in Verbindung gebracht werden. Durch die Unternehmensumfrage [125], an der 86 Unternehmen teilgenommen haben, wurden folgende Erkenntnisse gewonnen und daraus der Bedarf abgeleitet:

- Es besteht der Bedarf nach einem höheren Energieeffizienzgrad in der Produktion. Den treibenden Energiepreisen stehen Wettbewerbsvorteile sowie politische, soziale und umweltschonende Ziele gegenüber. [125]

Bedarf: Für einen energieeffizienten Herstellungsprozess wird ein einheitlicher und übergreifender Ansatz zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion benötigt.

- Obwohl Handlungsbedarf besteht, scheuen sich viele Unternehmen in Aktion zu treten, da das Verständnis für das System „energetische Bewertung von Produktionsprozessen“ noch nicht ausreichend vorhanden ist. [125]

Bedarf: Es müssen monetäre und technologische Voraussetzungen geschaffen werden, um das Bewusstsein für energetische Themen zu stärken und Entwicklungen voranzutreiben.

- Eine solide Basis für Energiedaten ist teuer und nur mit hohem technologischen Aufwand zu generieren. Diese Energiedaten betreffen die Produktion auf verschiedenen Ebenen – vom Werk beziehungsweise Standort bis hin zur Prozess- und Produktebene. [125]

Bedarf: Viele Unternehmen sehen keine rentable Investition in einer Datenbeschaffung. Diese Energiedaten sind allerdings Voraussetzung, um den Energieverbrauch und somit die Energieeffizienz von Produktionsprozessen zu ermitteln.

- Die Energieeffizienz von Produktionsprozessen ist meist nicht in die bestehenden ganzheitlichen Produktionssysteme eingebunden. Deshalb ist ein unternehmensübergreifender Vergleich nur schwierig umzusetzen. Es fehlt eine einheitliche Methode, z.B. in Form eines *Energie-Benchmarks* oder *Energy Production Systems*, um globale Standards zu entwickeln. [125]

Bedarf: Energiebilanz und Betriebsleistungen müssen miteinander verknüpft werden, um eine signifikante Aussage über den Effizienzgrad einer Produktion treffen zu können. Hierdurch entsteht eine höhere Komplexität und Mehrdimensionalität von Kennzahlen.

Herausforderungen und Handlungsbedarf für die Entwicklung einer einheitlichen Energieeffizienzbewertungsmethode

Nach umfassender Recherche wird die Feststellung getroffen, dass bisweilen keine einschlägige Methode oder Kennzahl in der Breite angewendet wird, die einen übergreifenden Vergleich der Energieeffizienz in der Produktion eindeutig beschreibt.

Das Ergebnis einer durchgeführten Methoden-, Richtlinien- und Normenrecherche, bei der keinerlei relevante und konkret umsetzbare Vorgaben zur operativen Durchführung eines übergreifenden Energieeffizienzvergleichs festgestellt wurden, bestätigt dies. Jedoch wurde beispielsweise ein Vergleich von gleichen Prozessen anhand von Energiekennzahlen in verschiedenen Unternehmen hinsichtlich der Energieeffizienz durchgeführt. Ausgewertet wurden unter anderem die Berichte „Energiekennzahlen für Betriebsvergleiche“ [146] und „Ermittlung von Energiekennzahlen für Anlagen, Herstellungsverfahren und Erzeugnisse“ [150]. Im Bericht „Energiekennzahlen für Betriebsvergleiche“ von Löffler wurde im ersten Schritt die Verwendung von Energiekennzahlen für Unternehmensvergleiche untersucht. Löffler kommt hierbei unter anderem zu dem Fazit, dass Quervergleiche von Energiekennzahlen generell bei der Identifikation von betrieblichen Einsparpotenzialen unterstützen können.

Jedoch wird auch die Schwierigkeit betont, passende Vergleichspartner zu finden. Nach der Analyse der Verwendungsmöglichkeiten von Energiekennzahlen wurde ein branchenspezifischer Energiekennzahlenkatalog erarbeitet. Hier erfolgte die Darstellung von branchentypischen Energiekennzahlen. Zudem wurden die wesentlichen Einflussgrößen auf diese sowie die vorhandenen Abhängigkeiten aufgezeigt. [150]

Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft weist in ihrem Bericht „Ermittlung von Energiekennzahlen für Anlagen, Herstellungsverfahren und Erzeugnisse“ [146] ein ähnliches Vorgehen auf. Nach einer umfassenden Darstellung der theoretischen Grundlagen wurden für diverse Wirtschaftszweige, insbesondere für energieintensive (u.a. Zement- oder NE-Metallherstellung), die typischen Energiekennzahlen beschrieben. Ein branchenübergreifender Vergleich erfolgte allerdings nicht. [146]

Die Problematik bei der kritischen Gegenüberstellung von Energiekennzahlen, selbst bei gleichen Prozessen, wird in der Literatur mit den verschiedenen Ausgangssituationen begründet [246]. Zum einen wirken auf Prozessabläufe verschiedene betriebsabhängige Einflussgrößen, die von der Anlagengröße bis hin zur Qualität der Rohstoffe reichen, zum anderen muss der Bilanzraum für die Erfassung der Energiekennzahlen exakt abgegrenzt werden.

Durch die Vielzahl von Unternehmensspezifika stellt es sich in der Praxis schwierig dar zwei Vergleichspartner zu finden, bei denen Einflussgrößen und Bilanzraum identisch sind. [150]

2.2 Die Begriffe Energie und Energieeffizienz als Grundbausteine für Energieeffizienzbewertungssysteme

Für einen übergreifenden Ansatz zur Beurteilung der Energieeffizienz muss der Begriff „Energieeffizienz“ eindeutig definiert werden. Dieser lässt sich in die Begriffe „Energie“ und „Effizienz“ aufschlüsseln und wird bis dato in keiner einheitlichen Form verwendet. Die Zusammenhänge des Begriffsverständnisses werden im Folgenden dargestellt.

Formen der Energie zur industriellen Nutzung

Energie liegt in unterschiedlichen Formen vor. Entlang der Energieumwandlungskette wird zwischen den vier Stufen Primärenergie, Sekundärenergie, Endenergie und Nutzenergie unterschieden (siehe Abbildung 6). Der Begriff Primärenergie beschreibt den Energiegehalt von Energieträgern die in der Natur vorkommen. Bei der Umwandlung natürlich vorkommender Energieträger zu Strom, Benzin, o.ä. entsteht Sekundärenergie. Wird diese dem Verbraucher zur Verfügung gestellt, spricht man von Endenergie. Nutzenergie beschreibt die vom Verbraucher genutzten Energieformen. Ein Teil der Primärenergie wird direkt in Nutzenergie umgewandelt. [167] [21]

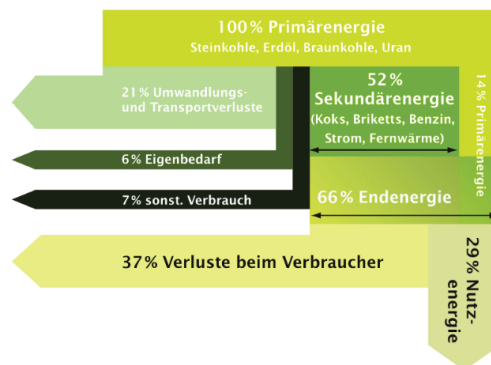


Abbildung 6: Energieformen mit Verlusten von Primär- bis Nutzenergie [103]

Soll zum Zwecke des Vergleichs verschiedener Energieformen eine Umrechnung erfolgen, müssen entstehende Umwandlungsverluste berücksichtigt werden, welche über die gesamte Umwandlungskette hinweg im ungünstigsten Fall bis zu 95% betragen [103]. Die Umrechnung von Endenergie in erforderliche Primärenergie erfolgt durch Multiplikation mit sogenannten Primärenergiefaktoren [167]. Oben stehende Abbildung gibt Aufschluss über den Anteil der jeweiligen Verluste (in Deutschland im Jahr 2008). Die allgemeingültige vierstufige Definition der Energieformen, „Primär-, Sekundär-, Nutz- und Endenergie“, wird im Kontext des industriellen Gebrauchs auf Basis der VDI-Norm 4661 [227] um die Formen „Bezugsenergie“, „Mindestenergieaufwand“, „Nichtenergetischer Verbrauch“ und „Exergie“ erweitert. Sie sind wie folgt definiert:

- **Primärenergie:** Der Energieinhalt von Energieträgern, von denen natürliche Vorkommnisse bestehen und die technisch noch nicht umgewandelt wurden, wird als Primärenergie bezeichnet. Es wird zwischen nuklearen, fossilen und regenerativen bzw. unerschöpflichen Energieträgern unterschieden. [227]
- **Sekundärenergie:** Als Sekundärenergie wird der Energieinhalt von Energieträgern verstanden, welche aus Primärenergieträgern durch einen oder mehrere technische Umwandlungsschritte gewonnen wurden. [227]
- **Bezugsenergie:** Der Energieinhalt aller gehandelten primären sowie sekundären Energieträger, welche der Endkonsument bezieht, wird als Bezugsenergie bezeichnet. Vor allem in älteren Auswertungen aus den neuen Bundesländern kann dieser Begriff häufig wiedergefunden werden. [227]
- **Endenergie:** Endenergie beschreibt den Energieinhalt aller gehandelten Energieträger, welche der Transformation beziehungsweise Generierung von Nutzenergie dienen. Gemäß den Absprachen, betreffend der Erstellung internationaler sowie nationaler Energiebilanzen, entspricht die Endenergie dem Energieinhalt der Bezugsenergie, reduziert um den Energieeinsatz bei der Eigenerzeugung von Gas und Strom beim Endverbraucher und dem Energieinhalt des nichtenergetischen Verbrauchs. [227]
- **Nutzenergie:** Alle vom Endverbraucher benötigten technischen Formen von Energie (Wärme, Licht, mechanische Energie, magnetische und elektrische Feldenergie sowie elektrische Strahlung), zur Ausführung von Energiedienstleistungen, werden der Nutzenergie zugeordnet. [227]
- **Mindestenergieaufwand:** Der thermodynamische Mindestenergieaufwand entspricht der Menge an Nutzenergie, die auf Basis von chemischen oder physikalischen Gesetzmäßigkeiten benötigt wird, um eine beabsichtigte Transformation am oder im betrachteten Objekt herbeizuführen. Beispielsweise stellt beim Erwärmen im Rahmen technischer Prozesse der Mindestenergieaufwand den Zuwachs an innerer Energie dar, welcher für die gewünschte Zustandsänderung des Gutes erforderlich ist. Theoretisch lässt sich der Nutzenergiebedarf bei einigen Energiedienstleistungen beliebig verkleinern. Dies ist z.B. bei Warmhaltevorgängen möglich, indem eine perfekte Wärmedämmung sowie eine gänzliche Vermeidung des Luftaustausches angenommen werden. [227]
- **Nichtenergetischer Verbrauch:** Der Energieinhalt von Stoffen, deren Anwendung durch ihre stofflichen Eigenschaften (z.B. Schmiermittel) und nicht durch ihren Energiegehalt bestimmt wird, und der Energieinhalt von Energieträgern, die nicht energetisch verwendet werden (z.B. Anwendung von Koks als Reduktionsmittel bei der Erzeugung von Roheisen), wird als nichtenergetischer Verbrauch deklariert. [227]
- **Exergie:** Exergie stellt den Teil der Gesamtenergie eines Systems dar, der maximal bei idealen Bedingungen als Arbeit entnommen werden kann. [227]

Gegenüberstellung existierender Definitionen von Effektivität, Effizienz und Produktivität im Kontext Energie

Zur aussagekräftigen Definition des Begriffes der Energieeffizienz wird zunächst der zugrundeliegende, allgemeine Begriff der Effizienz genauer betrachtet. In diesem Zusammenhang fällt auf, dass die Begriffe Effektivität, Effizienz, Produktivität und analog dazu auch Energieeffizienz und Energieproduktivität in der existierenden Fachliteratur häufig sehr ähnlich, teilweise aber auch invers, verwendet werden und nicht eindeutig definiert sind. Auf eine eindeutige Definition, verbunden mit einem eindeutigen Verständnis für den Begriff Energieeffizienz, kann zum heutigen Stand der Technik nicht zurückgegriffen werden, wie die folgende Gegenüberstellung in Tabelle 1 zeigt:

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Definitionen von Effektivität, Effizienz und Produktivität im Allgemeinen und im Kontext Energie

	Allgemein	Im Kontext Energie
Effektivität	- Maß für die Zielerreichung [103] [139] - Beurteilungskriterium mit dem sich beschreiben lässt, ob eine Maßnahme geeignet ist, ein vorgegebenes Ziel zu erreichen [84].	Geplanter Energieverbrauch / gemessener Energieverbrauch [229]
Effizienz	- Beurteilungskriterium, mit dem sich beschreiben lässt, ob eine Maßnahme geeignet ist, ein vorgegebenes Ziel in einer bestimmten Art und Weise (z.B. unter Wahrung der Wirtschaftlichkeit) zu erreichen [85]. - Output / Input beziehungsweise Nutzen / Aufwand [55] - Input / Output [187] - Ist-Wert / Vergleichsstandard [139] - Rentabilität (kaufmännische Bewertung der Effizienz) = Erfolgsgröße / eingesetztes Kapital [88]	- Output / Energieeinsatz [21] [168] [219] - Ertrag an Dienstleistungen, Gütern oder Energie / Energieeinsatz [54] [68] - Nutzenergie / eingesetzte Energie [103] - Ressourceneffizienz = Ist-Ressourceneffizienz / Referenz-Ressourceneffizienz [139] [121] - Effizienzgrad = Referenzwert / spezifischer Energiebedarf des gemessenen Produktionsprozesses [67] - Gesamtheitlicher Wirkungsgrad = Nutzen / Aufwand = Notwendige Energie / tatsächlich benötigte Energie [216] - Energieintensität (gesamt-wirtschaftlich) = Primärenergieverbrauch / Bruttoinlandsprodukt [187]
Produktivität	- Produktivität = Output / Input [139] [87] [35] - Faktorproduktivität = Output / Input des Einsatzfaktors (z.B. Arbeitsproduktivität, Kapitalproduktivität, Materialproduktivität) [35] - Wirtschaftlichkeit = Output / Input = Leistung / Kosten (wertmäßig) [139]	- Ressourcenproduktivität = Output / Ressourceninput [139] [121] - Energieproduktivität (gesamtwirtschaftlich) = Bruttoinlandsprodukt / Primärenergieverbrauch [187] - Energieproduktivität = Energieverbrauch / wirtschaftliche Leistung [103]

2.3 Kennzahlen als Maßgröße zur Unternehmenssteuerung

Kennzahlen sind definiert als hochverdichtete quantitative Maßgrößen, die als Verhältniszahlen oder absolute Zahlen in einer konzentrierten Form über einen zahlenmäßig erfassbaren Sachverhalt berichten. [143] Generell sind Kennzahlen eine Zusammenfassung von in Zahlen ausdrückbaren Informationen für den inner- und zwischenbetrieblichen Vergleich. [167] Sie stellen daher ein wichtiges Instrument zur Information und Steuerung von Unternehmensabläufen dar und sollen das Management bei der Entscheidungsfindung unterstützen. [245]

Kennzahlenarten und deren Darstellungskraft

Allgemein wird bei Kennzahlen zwischen absoluten Zahlen (Grundzahlen) und relativen Zahlen (Verhältniszahlen) unterschieden, wie in Abbildung 7 dargestellt.

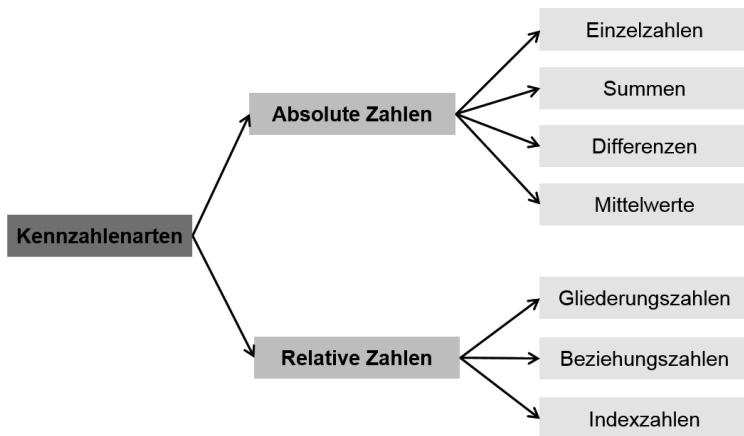


Abbildung 7: Einteilung von Kennzahlen [143]

Absolute Kennzahlen sind feste Wert- oder Mengengrößen. Zu dieser Kategorie gehören Einzelzahlen, Summen und Differenzen oder auch Mittelwerte. Beispiele hierfür sind der Umsatz, der Gewinn oder auch die Betriebsgröße eines Unternehmens. Eine alleinige Betrachtung einer absoluten Größe ist jedoch wenig aufschlussreich, weshalb ein Bezug zu weiteren absoluten Kennzahlen hergestellt werden sollte [245]. Relative Kennzahlen sind das Verhältnis zweier zueinander bezogener absoluter Größen [143]. Der essenzielle Mehrwert von relativen Zahlen besteht in der Möglichkeit, die Bedeutung von einzelnen Größen in Relation zu weiteren Sachverhalten darzustellen. Zudem lassen Verhältniszahlen keine Erkenntnisse auf die absoluten Grunddaten zu, anhand derer sie berechnet wurden. Dies stellt einen weiteren Vorteil dar, wenn die absoluten Werte nicht preisgegeben werden dürfen oder sollen, und dennoch ein Vergleich angestrebt wird. [143] Relative Zahlen können in Gliederungs-, Beziehungs- sowie Indexzahlen eingeteilt werden. [140] [175]

- **Gliederungszahlen:** Durch Gliederungszahlen wird der Anteil einer Größe an der Gesamtmenge angegeben. Da sich beide Werte auf denselben Tatbestand beziehen, liegt eine sachliche Beziehung zwischen Nenner und Zähler vor. Sie haben dieselbe Einheit, daher ermöglicht eine Gliederungszahl eine Aussage über das Gewicht des Zählers. [175]
- **Beziehungszahlen:** Im Gegensatz zu den Gliederungszahlen wird bei Beziehungszahlen eine Verknüpfung zwischen zwei ungleichartigen Größen hergestellt, bei denen ein Ursache-Wirkungs-Prinzip vermutet wird. Da sich bei Beziehungszahlen Nenner und Zähler auf verschiedenartige Größen beziehen, muss zwischen den Größen ein sachlich-logischer Zusammenhang gegeben sein, um den Informationsgehalt der Kennzahl gewährleisten zu können. [175]
- **Indexzahlen:** Bei Indexzahlen werden inhaltlich gleichartige, jedoch örtlich oder zeitlich unterschiedliche Größen, ins Verhältnis gesetzt (z.B. beim Lohnkostenindex). Hierbei wird der Zähler anhand einer Basisgröße gemessen. Indexzahlen liefern demzufolge eine Auskunft darüber, inwieweit die betrachtete Größe von einer Basisgröße abweicht und die Aussagekraft gegenüber absoluten Größen verstärkt. Typische Anwendungsfelder von Indexzahlen sind Kosten- oder Preisindizes. [175]

Anforderungen an Kennzahlen zur Unternehmenssteuerung

Wie Abbildung 8 zeigt, können an Kennzahlen verschiedene Anforderungen gestellt werden. Zunächst soll eine Kennzahl aussagefähig sein. Das bedeutet, sie soll sich zur Beobachtung eines realen Sachverhaltes eignen und diesen möglichst exakt beschreiben. Zudem ist auf eine ausreichende Aktualität und Vergleichbarkeit zu achten. Stehen die Ergebnisse nicht rechtzeitig zur Verfügung, so sind diese möglicherweise bereits nicht mehr aktuell. Für die Vergleichbarkeit ist es essenziell, dass die Definition und Berechnungsmethode der Kennzahl unverändert bleibt.

Übersichtlichkeit	Verständlichkeit	Vergleichbarkeit
Aussagefähigkeit	Aktualität	Ermittelbarkeit

Abbildung 8: Anforderungen an Kennzahlen [42]

Eine visuelle Darstellung von Kennzahlen trägt zu einer erhöhten Übersichtlichkeit bei, welche wiederum die Verständlichkeit fördert. Eine dem Empfänger entsprechende Gestaltung kann hier ebenso nützlich sein. So sollte eine Kennzahl für den Gebrauch im Shopfloor-Management gegenüber einer Kennzahl für die Managementebene eines Unternehmens unterschiedlich formuliert sein. Der Aufwand zur Ermittlung der Datenbasis sollte mit dem späteren Nutzen der Kennzahl abgewogen werden. [42]

Integration von Kennzahlen in Kennzahlensysteme

Unter einem Kennzahlensystem wird die Zusammenstellung von quantitativen Variablen verstanden, wobei die einzelnen Kennzahlen in einer sachlich sinnvollen Beziehung zueinander stehen. Diese ergänzen oder erklären einander und sind insgesamt auf ein gemeinsames übergeordnetes Ziel ausgerichtet. [193] Demzufolge fasst ein Kennzahlensystem beziehungslose Einzelkennzahlen zu einem systematischen und strukturierten Aufbau zusammen. Dies fördert die Übersichtlichkeit und steigert die Qualität der Gesamtaussage. [143]

2.4 Energiekenngrößen als kennzahlenbasierte Maßeinheiten zur quantitativen Darstellung der Energieeffizienz

Kennzahlen dienen dazu, Vorgänge oder Zustände in einer komprimierten und quantifizierbaren Form zu beschreiben, mit dem Ziel einen Erkenntnisgewinn herbeizuführen. In der Unternehmenspraxis werden Kennzahlen dementsprechend zur Planung, Überwachung, Steuerung und Analyse von komplexen organisatorischen, wirtschaftlichen oder technischen Sachverhalten eingesetzt. [150] Energiekennzahlen konnten, insbesondere über Branchen mit hoher Energieintensität hinaus, erst vor kurzer Zeit an Verbreitung sowie Bedeutung gewinnen. Hierzu haben unter anderem steigende Energiepreise sowie die Klimaschutzdiskussion beigetragen. [150]

Vorgehen zur Entwicklung spezifischer Energiekenngrößen

Um Anlagen, Prozesse oder Produkte hinsichtlich ihres Energieverbrauchs beziehungsweise ihrer Energieeffizienz bewerten und vergleichen zu können, müssen zunächst geeignete Energiekennzahlen definiert werden. Um diese zielgerichtet zu planen und zu erfassen, wurde das in Abbildung 9 dargestellte 5-Phasen Modell entwickelt. Das Modell setzt sich aus der Zieldefinition, der Prozessidentifizierung und Prozessanalyse, der Beachtung von Randbedingungen, der Kennzahlenentwicklungskette sowie der Implementierung zusammen. [25]

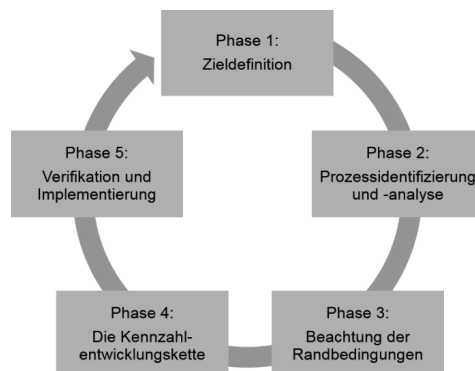


Abbildung 9: 5-Phasen Modell zur Kennzahlenentwicklung [25]

Überblick normierter und eingesetzter Energiekenngrößen in Relation zu Produktionsfaktoren

Folgend wird ein Überblick über verschiedene Energiegrößen gegeben sowie mögliche Bezugsgrößen für diese dargestellt, anhand derer eine Energiekennzahlenbildung durchgeführt werden kann. Sie werden durch die VDI-Norm 4661, mit dem Titel „Energiekenngrößen Definitionen – Begriffe – Methodik“ [227], beschrieben.

Energiekennzahlen werden üblicherweise auf Größen bezogen, welche den Nutzen der eingesetzten Energie wiedergeben. Es besteht die Möglichkeit, den Nutzen anhand monetärer oder physikalischer Größen zu erfassen. Kann der Nutzen der eingesetzten Energie nicht durch diese Größen dargestellt werden, ist es erforderlich Größen zu finden und zur Kennzahlenbildung heranzuziehen, die mit dem Nutzen eine Korrelation aufweisen. [150] In Tabelle 2 sind die allgemeinen Energiekennzahlen zusammengefasst. Diese werden gebildet, indem eine der möglichen Energiegrößen x ins Verhältnis zu einer Bezugsgröße y gesetzt wird.

Tabelle 2: Überblick über allgemeine Energiekennzahlen [150] [200]

Allgemeine Verhältniskennzahlen der Form $\frac{x}{y}$	
Energiegrößen x	Mögliche Bezugsgrößen y
- Primärenergie - Sekundärenergie - Bezugsenergie - Endenergie - Nutzenergie - Mindestenergieaufwand - Nichtenergetischer Verbrauch - Exergie	- Produzierte Einheiten - Wertschöpfung - Umsatz - Materialeinsatz - Personalaufwand - Mitarbeiter - Netto - Grundfläche - Brutto - Grundfläche - Nutzfläche - Gebäudenutzfläche - Bruttonutzhalt - Gesamtkosten

Je nach Auswahl der Energie- bzw. Bezugsgröße lässt sich eine Vielzahl an allgemeinen Energiekennzahlen bilden. Dies erschwert oder verhindert gar einen übergreifenden Vergleich, sofern in jedem Unternehmen andere Kenngrößen angewendet werden.

Aus diesem Grund existieren neben den allgemeinen Verhältniszahlen auch einige spezifische Energiekennzahlen, mit deren Hilfe versucht wird, einen übergreifenden Vergleich zwischen Unternehmen zu ermöglichen. In Tabelle 3 sind diese strukturiert nach den thematischen Blöcken Mitarbeiter, Gebäude, Anlage, Produkt, Prozess und monetäre Bewertung abgebildet. Neben der Kennzahl sind die Berechnungsweise, die Einheit und die relevanten Quellen abgebildet.

Tabelle 3: Spezifische Energiekennzahlen nach thematischen Blöcken

Spezifische Energiekennzahlen				
Mitarbeiter	Kennzahl	Berechnung	Einheit	Quellen
	Mitarbeiterspezifischer Energieverbrauch	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Anzahl der Mitarbeiter}}$	$\frac{kWh}{MA}$	[150] [92]
	Energieverbrauch bezogen auf Personalaufwand	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Personalaufwand}}$	$\frac{kWh}{h}$	[150]
Gebäude	Kennzahl	Berechnung	Einheit	Quellen
	Kompaktheit eines Gebäudes	$\frac{\text{Hüllfläche}}{\text{Gebäudevolumen}}$	m^{-1}	[167]
	Energieverbrauch bezogen auf Fläche	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Grundfläche}}$	$\frac{kWh}{m^2}$	[150] [248] [168]
	Energieverbrauch bezogen auf Volumen	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Rauminhalt}}$	$\frac{kWh}{m^3}$	[150] [168]
Anlage	Kennzahl	Berechnung	Einheit	Quellen
	Wirkungsgrad	$\frac{\text{Nutzbare abgegebene Energie}}{\text{Zugeführte Energie}} \cdot 100$	%	[167] [21] [139] [227]
	Nutzungsgrad (Zeitraumbetrachtung)	$\frac{\text{Nutzbare abgegebene Energie}}{\text{Gesamte zugeführte Energie}} \cdot 100$	%	[167] [227] [183]
	Equipment Energy Effectiveness	$\text{Energienutzungsgrad} \cdot \text{Energieleistungsgrad} \cdot \text{Energiequalitätsrate} \cdot 100$	%	[118]
Produkt	Kennzahl	Berechnung	Einheit	Quellen
	Spezifischer Energieverbrauch (Produzierte Einheit)	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Einheit}}$	$\frac{kWh}{\text{Stück}}$	[50] [105] [227] [148]
	Spezifischer Energieverbrauch (Masse der Einheit)	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Masse}}$	$\frac{kWh}{kg}$	[227] [200]
	Energieverbrauch bezogen auf Materialeinsatz	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Masse oder Volumen}}$	$\frac{kWh}{kg \text{ oder } l}$	[150] [139]
	Energieintensität	$\text{Leistungsaufnahme} \cdot \text{Kundentakt} \cdot \text{Anzahl Ressourcen}$	$\frac{kWh}{\text{Stück}}$	[21] [139] [67]
Prozess	Kennzahl	Berechnung	Einheit	Quellen
	Effizienzgrad	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Referenzeinsatzenergie}} \cdot 100$	%	[21] [139] [121]
	Durchschnittlicher spezifischer Energieverbrauch	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Zeit}}$	kW	[105] [200]
	Benötigte Energie für ein genormtes Testwerkstück	Einsatzenergie	kWh	[182]

Monetäre Bewertung	Kennzahl	Berechnung	Einheit	Quellen
	Umsatzspezifischer Energieverbrauch	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Umsatz}}$	$\frac{kWh}{\text{€}}$	[150] [92] [184] [82]
	Energieproduktivität	$\frac{\text{Wertschöpfung}}{\text{Einsatzenergie}}$	$\frac{\text{€}}{kWh}$	[187] [183] [184]
	Energieverbrauch bezogen auf Gesamtkosten	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Gesamtkosten}}$	$\frac{kWh}{\text{€}}$	[150]
	Anteil der Energiekosten an Gesamtkosten	$\frac{\text{Energiekosten}}{\text{Gesamtkosten}} \cdot 100$	%	[150] [200] [158]
	Anteil der Energiekosten an Gesamterlösen	$\frac{\text{Energiekosten}}{\text{Gesamterlöse}} \cdot 100$	%	[200]

Gültige Normen und Richtlinien zur Energieeffizienz

Es existieren eine Reihe von Normen und Richtlinien im Kontext Energie (zusammengefasst in Tabelle 4) bei welchen Energiekennzahlen ebenfalls Anwendung finden. Normen geben allgemeine Orientierungshilfe zur Handlung. Sie geben jedoch keine konkreten Methoden oder Vorgehensweisen vor.

Tabelle 4: Normen und Richtlinien im Kontext Energie und Energieeffizienz

Norm	Bezeichnung	Beschreibung
DIN EN 16231	Energieeffizienz - Benchmarking - Methodik	- Festlegung von Begriffen, Anforderungen und Prozessen für Energieeffizienz-Benchmarking - Beschreibung der wesentlichen Qualitätsanforderungen von Energie-Benchmarking [50]
DIN EN ISO 50001	Energiemanagementsysteme (EnMS)	- Anforderungen an ein EnMS - Anleitung zur Anwendung [54]
VDI 4661	Energiekenngrößen - Definitionen, Begriffe, Methodik	- Definition einiger spezieller Kenngrößen - Leitfaden zur Ermittlung, der Quantifizierung und der Anwendung von Kenngrößen [227]
DIN EN 16212	Energieeffizienz und Einsparberechnung	- Vorgehensweise zur Berechnung von Energieeffizienz und Energieeinsparungen nach Top-Down- und Bottom-Up-Methoden - Einsetzbar für Gebäude, Autos, Geräte und Industrieprozesse [49]
DIN EN ISO 14031	Umweltmanagement - Umwelleistungsbewertung - Leitlinien	- Anleitung zur Gestaltung und Durchführung der Umwelleistungsbewertung innerhalb einer Organisation - Umweltkennzahlen [53]
VDI 3807 Blatt 4	Energie- und Wasserverbrauchs-kennwerte für Gebäude; Kennwerte elektrischer Energie	- Grundlage für Analyse und Beurteilung des elektrischen Energieverbrauchs von bestehenden Gebäuden [224]

Grenzen der Nutzung heutiger Energiekenngrößen

Um einen aussagekräftigen Vergleich zu gewährleisten, ist es prinzipiell nur sinnvoll, Kennzahlen unter ähnlichen oder gleichen Rahmenbedingungen zu vergleichen. Da dies jedoch nur selten gegeben ist, sind die Ergebnisse eines Vergleiches unter Einbezug der Einflussfaktoren zu interpretieren.

Nachfolgend werden die in der Literatur beschriebenen Einflussgrößen auf Energiekennzahlen näher betrachtet. Abbildung 10 veranschaulicht die wesentlichen Einflussgrößen, die laut VDI 4661 Einfluss auf den Energieverbrauch einer Anlage beziehungsweise eines Prozesses ausüben [227].

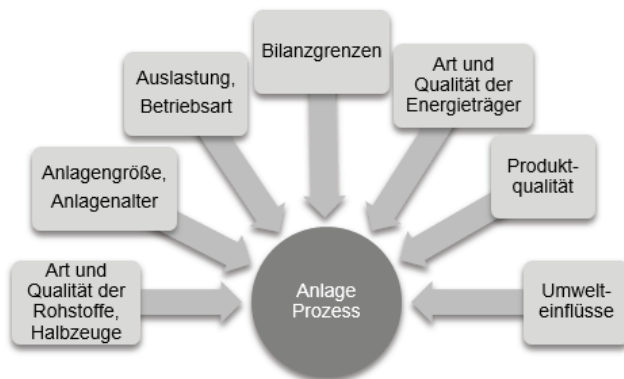


Abbildung 10: Einflussgrößen für Energiekennzahlen [146] [228]

Der Gesamtenergieumsatz wird typischerweise von der Anlagengröße beziehungsweise deren Nennkapazität bestimmt. Unter Umständen weist eine kleinere Anlage gegenüber einer größeren Anlage einen niedrigeren absoluten Energieverbrauch auf. Üblicherweise sind jedoch die relativen Verluste bei einer kleineren Anlage in der Regel höher. [146] [150] [199] Dies führt zu einem besseren Nutzungsgrad im Nennbetriebspunkt von größer ausgelegten Anlagen. Durch die Angabe von Anlagenkennlinien ist es möglich die Abhängigkeit des spezifischen Energieverbrauchs von der Anlagengröße aufzuzeigen. [146] Neben der Anlagengröße ist das Alter der Anlage ein Indikator für die Höhe des spezifischen Energieverbrauchs beziehungsweise des Wirkungsgrades. Die Auslastung der Anlagen gilt als weiterer wesentlicher Einflussfaktor auf den Energieverbrauch. Bei fast allen Anlagentypen setzt sich der Gesamtenergieverbrauch aus einem konstanten Grundverbrauch und aus einem auslastungsabhängigen, variablen Energiebedarf zusammen. Auch eine Überlastung der Anlage kann zu einer Reduktion des Wirkungsgrades und folglich zu einer Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs führen. [146]

Alle am Verfahren beteiligten Stoffe wirken sich auf den Energiebedarf aus. Bei der Herstellung und Weiterverarbeitung eines Produkts bestimmen die Art und Qualität der

Rohstoffe in einem entscheidenden Maß den Energieverbrauch. [227] Einen weiteren Einflussfaktor stellt die Art und Qualität der Energieträger dar. Der chemische Aufbau und der Aggregatzustand sind bei Brennstoffen die entscheidenden Faktoren. [227] Darüber hinaus muss der Einfluss der Umwelt auf den Energieverbrauch berücksichtigt werden. Klimatische Bedingungen wie Witterung, Jahreszeit oder Klimazone wirken sich deutlich auf den Energieverbrauch zur Regulierung der Raumtemperatur oder auf die erforderliche Beleuchtung aus. Zudem erfordern extreme Bedingungen gegebenenfalls Prozessanpassungen, welche zusätzlich Einfluss auf den Energieverbrauch nehmen. [150] Bevor mit der Analyse beziehungsweise der Messung von Energie- oder Stoffverbräuchen begonnen werden kann, ist es erforderlich, die Bilanzgrenzen, sprich den Bilanzraum eindeutig zu definieren. Insbesondere bei komplexen Anlagen werden gute Fach- und Sachkenntnisse benötigt, um die einzelnen Komponenten und Anlagen sinnvoll abzugrenzen. Eine Abgrenzung kann grundsätzlich nach verschiedenen Kriterien erfolgen. [146] Bilanzgrenzen können von einzelnen Komponenten und Maschinen, Anlagen oder Anlagenbestandteilen, Anlagengruppen, Produktionsbereichen bis hin zu Standorten oder Unternehmen reichen. In Abbildung 11 sind mehrere mögliche Ausprägungen von Bilanzräumen einer Produktionsanlage dargestellt. [146]

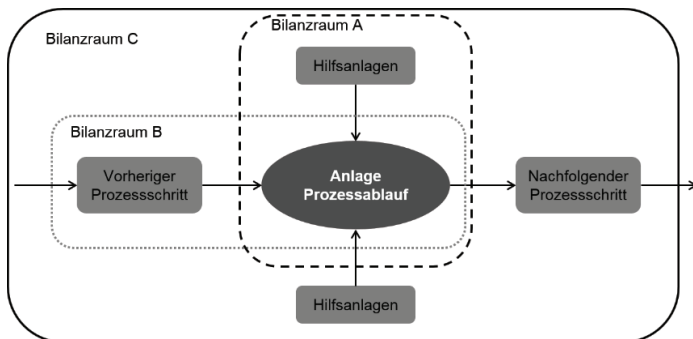


Abbildung 11: Mögliche Ausprägungen von Bilanzräumen [146]

Diese Abgrenzung kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen. Es ist bei komplexen Anlagen darauf zu achten, dass einzelne Komponenten beziehungsweise Anlagen einheitlich und sinnvoll abgegrenzt werden. Weiterhin ist bei der Abgrenzung zu berücksichtigen, dass diese für mögliche Vergleichsobjekte einheitlich zu definieren sind. Festlegen lassen sich die Grenzen der Bilanzräume sowohl räumlich als sogenannte Systemgrenzen, als auch zeitlich als Periode, in der die Datenerhebung erfolgen soll. Bei der Abgrenzung von Maschinen und Anlagen muss entschieden werden, welche vor- und nachgelagerten Prozesse sowie Hilfsprozesse in den Bilanzraum einzubringen sind. Gleichsam muss bei Betriebsvergleichen darauf geachtet werden, dass die zu vergleichenden Betriebe ähnliche Prozessschritte und Fertigungstiefen aufweisen. [146]

Anwendungsmöglichkeiten für Energiekenngrößen im Betriebsumfeld

Die Einsatzfelder von Energiekennzahlen sind vielfältig. Abbildung 12 stellt die Anwendungsmöglichkeiten von Energiekennzahlen nach Bauer dar. [12]

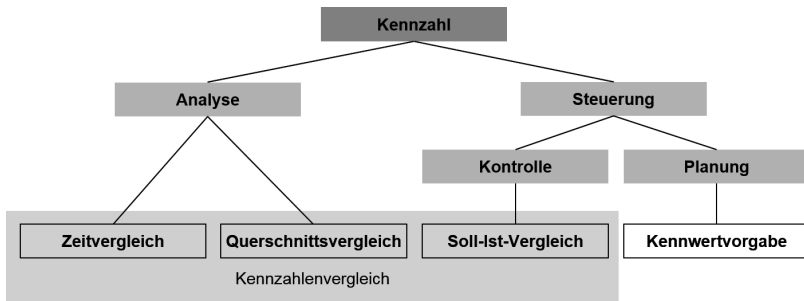


Abbildung 12: Anwendungsmöglichkeiten von Energiekennzahlen [12]

Für das Energiemanagement können Energiekennzahlen zur Steuerung sowie zur Analyse verwendet werden. Die Analyse gliedert sich in Zeit- und Querschnittsvergleiche. Zur Steuerung zählen die Kontrolle und die Planung. Bei Zeitvergleichen wird der zeitliche Verlauf einer Größe betrachtet. Unterschiedliche Kennwerte, vom aktuellen zum vorgelagerten Betrachtungszeitraum, deuten auf Veränderungen in der Betriebsweise der Anlage oder auf Störungen hin. Wird eine gleichartige Kennzahl auf verschiedene, aber dennoch ähnliche Einheiten bezogen, spricht man von einem Quervergleich. Für die Steuerung der betrieblichen Energiewirtschaft werden Energiekenngrößen zur Planung und zur Kontrolle eingesetzt. Zukünftige Kennwerte können als Ziel, basierend auf den erlangten Erkenntnissen innerhalb der Analyse, definiert werden. Das Maß der Zielerreichung kann folglich durch den Abgleich von Ist- und Soll-Werten beurteilt werden. Zudem wird es ermöglicht, Energieeinsparungsmaßnahmen quantitativ zu bewerten. [227] Ein Kennzahlenvergleich kann für unterschiedliche Bilanzräume und auf verschiedenen Ebenen erfolgen. Der Verfahrens-, der Anlagen- und der Betriebsvergleich sind hier von wesentlicher Bedeutung: [227]

- **Verfahrensvergleich:** Bei einem Verfahrensvergleich werden verschiedene Verfahren mit ähnlichem beziehungsweise vergleichbarem Output verglichen.
- **Anlagenvergleich:** Hier werden Produktionsanlagen hinsichtlich ihres spezifischen Energieverbrauchs gegenübergestellt. Als Bewertungsgrundlage können Richtwerte oder Kennzahlen vergleichbarer Produktionsanlagen verwendet werden.
- **Betriebsvergleich:** Bei einem Betriebsvergleich werden Unternehmen, respektive Betriebe, verglichen. Hier wird die Energieintensität von Unternehmen anhand der betriebsspezifischen Energiewerte dargestellt.

Ein weiteres Anwendungsfeld für Kennzahlen stellt das im folgenden Kapitel beschriebene Benchmarking dar.

2.5 Benchmarking als Instrument zur Erfolgssteigerung

Die Messung und der Vergleich von unternehmensinternen oder -externen Prozessen, Produkten oder Strategien zur eigenen Leistungssteigerung sind in vielen Bereichen üblich und werden durch die Begriffe „Benchmark“ und „Benchmarking“ beschrieben.

Die Begriffe Benchmark und Benchmarking im Überblick

Benchmarking stellt ein Managementinstrument zur Wettbewerbsanalyse und zur kontinuierlichen Verbesserung der Wettbewerbssituation dar [225]. Zielobjekte, die es zu optimieren gilt, können demnach Produkte, Dienstleistungen oder Praktiken sein. Benchmarking sucht nach den Lösungen der stärksten Konkurrenten. In der Literatur wird in diesem Zusammenhang häufig der Begriff „Best Practices“ genannt, dessen Bedeutung jedoch nicht einheitlich definiert ist. [101] Darüber hinaus ist ebenfalls ein unternehmensinternes Benchmarking², zum Beispiel auf Standort- oder Fertigungsebene denkbar. Während Benchmarking eine Methodik beziehungsweise einen Prozess beschreibt, ist der Begriff Benchmark im Sinne eines Referenz- oder Vergleichswertes einer gemessenen Bestleistung davon abzugrenzen. [40]

Faktoren zur Erfolgssteigerung durch Benchmarking

Generell zielt Benchmarking auf den Auf- und Ausbau von Wettbewerbsvorteilen gegenüber der Konkurrenz ab, um den eigenen Unternehmenserfolg zu steigern. Um dieses Ziel zu erreichen, streben Unternehmen Kostenreduktionen, Qualitätsverbesserungen und/oder Rationalisierungen von Bearbeitungsabläufen an. [24] Daraus lassen sich zwei wesentliche Zielvorgaben von Benchmarking ableiten: einerseits Leistungsabweichungen im Hinblick auf Zeit, Kosten oder Qualität zwischen dem eigenen Unternehmen und dem Benchmarking-Vergleichspartner zu identifizieren, und andererseits zu verstehen wie diese zustande kommen, um in der Lage zu sein, die Leistungslücke zu schließen. Basierend auf diesen Zielvorgaben sind folgende Vor- und Nachteile von Benchmarking zu nennen (vgl. Tabelle 5 [244] [208]):

Tabelle 5: Vor- und Nachteile des Benchmarkings

Vorteile des Benchmarkings	Nachteile des Benchmarkings
• Übernahme von „Best Practices“ • Bestimmung objektiver Produktivitätsmaße • Planmäßige Beseitigung der Differenzen • Verbesserung der Wettbewerbsposition • Erkennen technologischer Durchbrüche • Steigerung der Motivation der Mitarbeiter	• Austausch sensibler Daten • Relativ hohe Kosten • Auswahl der Benchmarking-Partner • Vergleichbarkeit von Prozessen • Wenige Fachleute mit Erfahrungsschatz

² „Benchmarking steht für den kontinuierlichen, systematischen Prozess, mittels Messung, Vergleich und Analyse geeigneter Benchmarks Strategien, Prozesse/Funktionen, Methoden/Verfahren oder Produkte/Dienstleistungen einer Organisationseinheit zum Zwecke der Sicherung oder Steigerung des Unternehmenserfolgs zu verbessern“ [24].

2.6 Energie-Benchmarking als erweitertes Instrument zur Energieeffizienzbewertung und Erfolgssteigerung

2012 wurde die Norm DIN EN 16231:2012 veröffentlicht, welche Begriffe, Anforderungen und Prozesse für Energieeffizienz-Benchmarking in der Fertigungsindustrie beschreibt [50]. Ausdrückliches Ziel dieses Energieeffizienz-Benchmarkings ist es, Verbesserungspotenziale aufzudecken, um den Energieverbrauch und die damit verbundenen Kosten sowie negativen Umweltauswirkungen zu senken [50]. Die Energieeffizienz beruht dabei auf dem spezifischen Energieverbrauch, das heißt dem Energieverbrauch pro Ausgabeeinheit. Die Vorgehensweise beim Energieeffizienz-Benchmarking entspricht der allgemeinen Vorgehensweise beim Benchmarking [50]. Jedoch werden in der Norm keine konkreten Energiekennzahlen definiert, die als Benchmark dienen können. Die Suche nach geeigneten Benchmarks stellt demnach die wesentliche Herausforderung dar.

Ziele und Potenziale durch Energie-Benchmarking für Unternehmen

Der Einsatz von Energie-Benchmarking dient wie Benchmarking allgemein dem Zweck der Steigerung des Unternehmenserfolgs. Durch den Vergleich eigener Energiekennzahlen mit denen eines selektierten Benchmarking-Partners werden Unterschiede hinsichtlich der Energieeffizienz offengelegt, deren Analyse Optimierungspotenziale sichtbar machen. Energiekennzahlen helfen dabei, indem sie komplexe energetische Zusammenhänge vereinfacht darstellen und somit die Analyse erleichtern. Die strukturierte Vorgehensweise des Benchmarking hilft zudem, notwendige Informationen zu identifizieren und zielgerichtet auszuwerten. [105] [92] Bei richtiger Nutzung der ermittelten Optimierungspotenziale kann eine Steigerung der Energieeffizienz erreicht werden. Dies führt auf direktem Wege zu einer Senkung des Energieverbrauchs und damit der Energiekosten. Abbildung 13 zeigt die beschriebenen Wege zur Steigerung des Unternehmenserfolgs durch die Anwendung von Energie-Benchmarking.

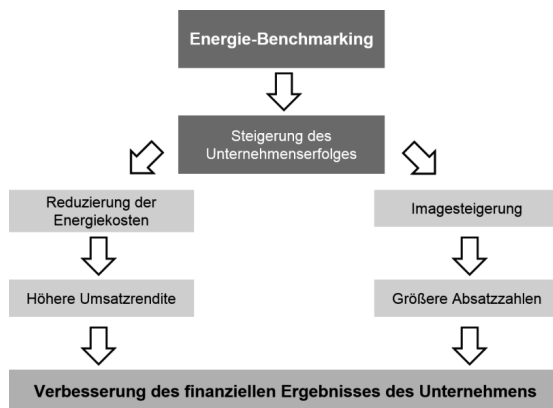


Abbildung 13: Steigerung des Erfolgs durch Energie-Benchmarking

Betriebliche Anwendungsfelder eines Energie-Benchmarkings

Der Vergleich der Energieeffizienz mittels Energie-Benchmarking kann auf verschiedenen Betrachtungsebenen erfolgen. Generell sind Vergleiche zwischen Branchen, Unternehmen, Standorten, Anlagen, Produkten und Prozessen möglich. In Abbildung 14 sind die Verflechtungen und die dadurch entstehende Komplexität der verschiedenen Betrachtungsebenen dargestellt. Auf der untersten Ebene werden einzelne Prozesse hinsichtlich ihrer Energieeffizienz bewertet. Dabei sollen sowohl gleiche, ähnliche als auch grundverschiedene Produktionsprozesse mittels Kennzahlen vergleichbar sein. Auf der nächsten Ebene soll die Energieeffizienz von gleichen, ähnlichen und unterschiedlichen Produkten bewertet werden und eine Aussage darüber getroffen werden können, welches Produkt energieeffizienter hergestellt wurde. [133]

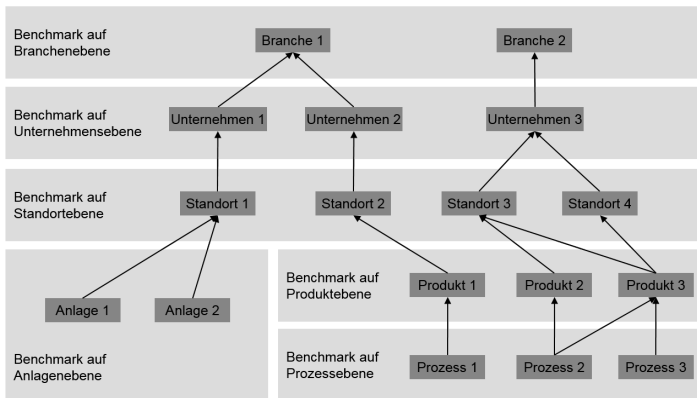


Abbildung 14: Betrachtungsebenen von Energie-Benchmarking [133]

Für eine produktübergreifende Beurteilung, welches Objekt energieeffizienter hergestellt wurde, gibt es bis dato keine konkreten Ansätze. Werden mehrere Produktionsprozesse auf einer Anlage durchgeführt, können analog Anlagen hinsichtlich ihrer Energieeffizienz miteinander verglichen werden. Ein Vergleich verschiedener Standorte kann vor allem dann Aufschluss auf Einsparpotenziale geben, wenn an den betrachteten Standorten dieselben Produkte hergestellt werden. Jedoch sollen auch Standorte auf dieser Betrachtungsstufe im Fokus stehen, in denen verschiedene Produkte hergestellt werden. Auf der nächsthöheren Ebene werden Unternehmen hinsichtlich ihrer Energieeffizienz gegenübergestellt. Hier stellt sich insbesondere die Frage, inwieweit periphere Energieverbraucher in die Kennzahlenbildung einfließen, die nicht direkt zur Wertschöpfung beitragen. Benchmarking auf Branchenebene umfasst nicht allein einen Vergleich zweier Branchen, sondern kann im Sinne eines externen, branchenunabhängigen Benchmarking aufgefasst werden. Dementsprechend können mithilfe eines Benchmarks auf Branchenebene auch Unternehmen verschiedener Branchen bzw. deren Standorte, Prozesse oder Produkte verglichen werden.

3 Analyse und Erweiterung gültiger Kennzahlen und Methoden für die Energieeffizienzbewertung

Anhand der Analyse vorhandener Kennzahlen und Methoden sollen mögliche Instrumente zur Bemessung und zum übergreifenden Vergleich der Energieeffizienz identifiziert werden. Hierfür werden Kriterien auf Basis von grundlegenden Anforderungen an eine Methodik zur Energieeffizienzbewertung definiert.

Anschließend werden vorhandene Kennzahlen und Total Quality Management (TQM), Lean Management und Six Sigma Methoden hinsichtlich ihrer Eignung für einen Energieeffizienzvergleich analysiert. Bei der Analyse von Kennzahlen werden sowohl Energiekennzahlen aus der Fachliteratur als auch Kennzahlen aus veröffentlichten Geschäftsberichten verschiedener Unternehmen herangezogen.

Kennzahlen und Methoden, die sich aufgrund der Analyse als geeignet herausstellen, werden im Folgenden für einen Energieeffizienzvergleich erweitert und neu konzipiert.

3.1 Anforderungskriterien zur einheitlichen, übergreifenden und expressiven Bewertung der Energieeffizienz

Im Rahmen der Dissertation von Dr. Holger Haag zur Thematik „Modellbasierte Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion“ [95] wurden sechs Anforderungen an eine Methodik zur Energieeffizienzbewertung in der Produktion abgeleitet. Ausgangspunkt für diese Anforderungen stellen Schwachstellen bei der Planung und Bewertung des energetischen Verhaltens dar.

Grundsätzliche Anforderungen an eine Methodik nach Haag

Nach Haag wurden die folgenden Schwachstellen bei der Planung und Bewertung des energetischen Verhaltens in der Produktion identifiziert [95]:

- Mangelnde Abbildung und Beherrschung der Komplexität
- Mangelnde Betrachtung der Wechselwirkungen der beteiligten Ressourcen
- Mangelnde Darstellung des Energieverbrauchs in transparenter und vergleichbarer Weise
- Mangelnde Betrachtung aller Phasen, in denen Energie festgelegt sowie verbraucht wird
- Mangelnde Möglichkeit, um identifizierte Optimierungspotenziale umzusetzen
- Mangelnde Entscheidungsfindung auf Basis aktueller Daten

Auf Basis dieser identifizierten Schwachstellen wurden die folgenden sechs grundsätzlichen Anforderungen an eine Methodik zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion abgeleitet [95]:

- **Modellbasierter Ansatz:** Durch die Unterstützung von Modellen können komplexe energetische Zusammenhänge strukturiert dargestellt werden. Dabei muss das System mit allen Abhängigkeiten und Einflussgrößen der einzelnen Ressource bis hin zum betrachteten Gesamtsystem modelliert werden. Ziel eines modellbasierten Ansatzes ist es, die Komplexität zu beherrschen. Dabei gilt grundsätzlich, dass die Realität durch ein Modell so einfach wie möglich, aber so genau wie nötig nachgebildet werden soll.
- **Berücksichtigung der Peripherie:** Für eine ganzheitliche Betrachtung der Energieeffizienz in der Produktion ist neben den Hauptprozessen auch eine Berücksichtigung aller peripheren Systeme erforderlich. Zur Peripherie zählen unterstützende Prozesse, ohne die der Hauptprozess nicht möglich ist. Diese haben oft einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch und die Energieeffizienz.
- **Berücksichtigung der Planungsphase:** Die Berücksichtigung von relevanten einmaligen und zyklischen Planungstätigkeiten im Rahmen der Arbeitsvorbereitung ist von Bedeutung, da in der Planungsphase ein Großteil des späteren Energieverbrauchs beeinflusst werden kann.
- **Bewertung und Vergleich auf Basis von Kennzahlen:** Für eine Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion ist es erforderlich, ein geeignetes Kennzahlensystem abzuleiten. Dieses Kennzahlensystem muss klassische Zielgrößen wie beispielsweise die Durchlaufzeit berücksichtigen und soll die Basis für die Ermittlung von Optimierungspotenzialen darstellen.
- **Integration einer Felddatenerfassung:** Zur Gewährleistung der Verwendung von korrekten Daten wird eine Integration einer Felddatenerfassung vorgeschlagen, welche neben den Informationen über den Energieverbrauch alle relevanten Daten für die Produktion bereitstellt.
- **Optimierungsmaßnahmen/Rückführung des optimalen Parametersatzes:** Neben der Bewertung der Energieeffizienz ist die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen ein übergeordnetes Ziel eines Energieeffizienzbewertungssystems. Parametersätze, welche als geeignet bewertet wurden, müssen in Form modifizierter Eingangsgrößen in die Arbeitsvorbereitung zurückgeführt werden, um in der Planung die energieoptimalen Vorgaben umzusetzen.

Die beschriebenen Anforderungen [95] sind für eine Methodik zur übergreifenden Bewertung der Energieeffizienz nicht vollständig. Zur Gewährleistung einer übergreifenden Vergleichbarkeit, der Bemessung und expressiven Darstellung der tatsächlichen Energieeffizienz müssen weitere Anforderungen definiert werden [123]. Darüber hinaus werden zusätzliche Anforderungen zur operativen Anwendbarkeit einer Methodik zur Energieeffizienzbewertung definiert. Hierbei wird von einer optimalen Methode ausgegangen, die folgende Aspekte eindeutig darstellt:

- Eindeutige Bemessung der Energieeffizienz
- Aufdeckung von Verbesserungspotenzialen mit Entstehungsbezug
- Umfassende Beurteilung aller Produktionsprozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette
- Berechnungsgrundsätze zur Vorbestimmung des Energiebedarfs
- Zuordenbarkeit und Berücksichtigung aller Energieverbräuche und vorbestimmter Bedarfe in granularer Form entlang der Wertschöpfungskette
- Berücksichtigung aktuell vorliegender Verbräuche
- Darstellung der tatsächlichen Energieeffizienz durch einschlägige Kennzahlen, bezogen auf die wertschöpfenden Prozesse im Einzelnen und die Herstellung eines Produkts im Gesamten
- Ausgabe eindeutiger Kennzahlen zur Implementierung in ein Produktions- und Unternehmenscontrolling, zur Maßnahmenableitung und Zieldefinition

Die Energieeffizienz muss grundsätzlich produktbezogen messbar gemacht werden. Insbesondere die Energieeffizienz einer Anlage oder eines Produktionsprozesses beeinflusst die energieeffiziente Herstellung eines Produkts. Hier bestehen die meisten Einsparpotenziale. Ziel ist es folglich, die Energieeffizienz eines Produkts hinsichtlich der Herstellung auf allen Ebenen mithilfe einer Methode oder Kennzahl vergleichbar zu machen. Deshalb sind Methoden und Kennzahlen so auszulegen, dass sie sich für die Bewertung der Energieeffizienz bestimmter Hierarchieebenen eignen. Daraus ergeben sich sieben Anforderungen analog den Hierarchiestufen in Abbildung 15:



Abbildung 15: Hierarchiestufen und abgeleitete Anwendungsbereiche [123]

Die von Haag definierten Schwachstellen können insofern als Basisanforderungen angesehen werden. Zur Gewährleistung einer übergreifenden Vergleichbarkeit durch expressive Darstellung der Energieeffizienz und zur operativen Umsetzung einer solchen Bewertungsmethode sind allerdings folgende Anforderungen unerlässlich:

Anforderungen zur Gewährleistung einer übergreifenden Vergleichbarkeit

- **Messbarkeit verschiedener Energieformen:** Da Energie in verschiedenen Formen vorliegt [177], ist eine übergreifende Messbarkeit von Energie erforderlich. Für eine umfassende Betrachtung der Energieeffizienz in der Produktion müssen alle beteiligten Energieverbraucher (einschließlich Abwärme und andere Energieverluste) quantitativ messbar sein. Hierfür werden geeignete Messgeräte benötigt, welche präzise und gegebenenfalls in kurzen zeitlichen Intervallen korrekte Messwerte aufnehmen. [165]
- **Expressive Bewertung der Energieeffizienz:** Mit dem Ziel der übergreifenden Vergleichbarkeit von Energieeffizienz muss bei der Bestimmung der Effizienz neben dem gemessenen Ist-Wert auch der mindestens erforderliche Energieeinsatz berücksichtigt werden. Viele Methoden vergleichen die Energieeffizienz lediglich anhand eines gewählten Referenzwertes, nicht jedoch anhand des optimalen Energieeinsatzes. Nur wenn ein Referenzwert der mindestens erforderlichen Energie bekannt ist, sind auch Aussagen über das tatsächlich realisierbare Optimierungspotenzial möglich. [123]
- **Konvertierung in ein einheitliches System:** Unterschiedliche Energieformen werden auf verschiedene Weise gemessen und folglich in verschiedenen Einheiten angegeben. Für eine korrekte Bestimmung und Bewertung der Energieeffizienz ist es unabdingbar, alle beteiligten Energieverbraucher in die gleiche Einheit umzurechnen, um damit die Vergleichbarkeit von Energieverbrauchern und Prozessen zu gewährleisten. [106]
- **Übergreifende Vergleichbarkeit:** Eine geeignete Methode oder Kennzahl für die Bewertung der Energieeffizienz hat das übergeordnete Ziel, unterschiedliche Produkte in Bezug auf ihre Herstellung sowie verschiedene Fertigungsprozesse und Ebenen eines Unternehmens zu vergleichen [87]. Das bedeutet, dass Aussagen über die Energieeffizienz nur übergreifend erfolgen können, wenn Kennzahlen eine unternehmens- und branchenweite Vergleichbarkeit gewährleisten und so Optimierungspotenziale auf allen Ebenen ableitbar sind.
- **Skalierung der Daten und Informationen:** Durch die Skalierbarkeit wird ausgedrückt, ob Daten und Informationen auf alle Betrachtungsebenen in einem Unternehmen übertragen werden können. Nur dadurch ist ein übergreifender Vergleich über alle Betrachtungsebenen hinweg gewährleistet [156].
- **Diskrete Datenaufnahme:** Je nach Branche und Unternehmen werden Energieverbräuche in unterschiedlichen zeitlichen Intervallen erfasst. Grund hierfür sind unterschiedliche Prozess- und Durchlaufzeiten von Fertigungsprozessen, die wenige Sekunden bis mehrere Stunden betragen können [28]. Für einen unternehmens- oder branchenübergreifenden Vergleich der Energieeffizienz in

der Produktion müssen jedoch gleiche Rahmenbedingungen für die Datenaufnahme festgelegt werden. Die Energiedatenerfassung muss in einem konstanten Intervall entsprechend der Prozesszeiten erfolgen [123].

- **Anbindung an ein Datenmanagementsystem:** Kleine Messintervalle oder dauerhafte Messungen sowie zahlreiche Einflussfaktoren bewirken eine große Datenmenge. Diese Daten müssen verarbeitet werden, um daraus entsprechende Kennwerte und Kennzahlen zu generieren. Daher ist eine Anbindung an Systeme wie Datenbanken oder ERP-Systeme für den Umgang mit diesen Datenmengen notwendig [156].
- **Berücksichtigung von Energieumwandlungen und -verlusten:** Bei der Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion muss nicht nur der Energieverbrauch der Prozesse berücksichtigt werden, sondern auch Energieverluste, die bei Energieumwandlungen auftreten [38].

Anforderungen zur operativen Anwendbarkeit einer Methode

- **Anwendbarkeit auf Produktebene:** Übergeordnetes Ziel ist, die Energieeffizienz unterschiedlicher Produkte mithilfe einer geeigneten Methode vergleichbar zu machen. Aber auch Produkte der gleichen Art können mit verschiedenen Fertigungsprozessen oder auf unterschiedlichen Anlagen hergestellt werden. [98] Dies beeinflusst den Energieverbrauch bei der Herstellung erheblich und wirkt sich folglich auf die Energieeffizienz aus. Eine Methode zur Bewertung der Energieeffizienz muss deshalb einen umfassenden Vergleich auf Produktebene ermöglichen. [71] [132]
- **Anwendbarkeit auf Prozessebene:** Ziel dieser Anforderungen ist, unterschiedliche Fertigungsprozesse trotz unterschiedlicher Prozessparameter vergleichend gegenüberstellen zu können [123].
- **Anwendbarkeit auf Anlagenebene:** Methoden oder Kennzahlen müssen außerdem auf Anlagenebene genutzt werden können. Selbst wenn bei der Herstellung die gleichen Fertigungsprozesse verwendet werden, können sich die Fertigungsanlagen und somit die Energieeffizienz unterscheiden [123].
- **Anwendbarkeit auf Werks-/Abteilungsebene:** Bei vielen Unternehmen wird das gleiche Produkt in verschiedenen Werken gefertigt. Dabei finden häufig unterschiedliche Fertigungstechnologien oder Fertigungsabläufe Anwendung. Deshalb muss eine geeignete Methode oder Kennzahl einen Energieeffizienzvergleich auch auf dieser Ebene gewährleisten können [71].
- **Anwendbarkeit auf Standortebene:** An unterschiedlichen Standorten eines Unternehmens können unterschiedliche Fertigungsprozesse und verschiedene Faktoren, wie Umwelteinflüsse, die Energieeffizienz bei der Herstellung beeinflussen. Eine geeignete Methode zur Energieeffizienzbewertung muss deshalb

diese Faktoren berücksichtigen und die Energieeffizienz auch auf Standortebene vergleichbar machen können. [71]

- **Anwendbarkeit auf Unternehmensebene:** Produkte der gleichen Art können mit verschiedenen Werkzeugen, Prozessen, auf unterschiedlichen Anlagen sowie in anderen Werken oder an anderen Standorten gefertigt werden. Eine geeignete Methode zur Energieeffizienzbewertung muss daher auch die Energieeffizienzmessung auf Unternehmensebene ermöglichen. [71]
- **Anwendbarkeit auf Branchenebene:** Zum einen sollen Produkte aus unterschiedlichen Branchen hinsichtlich ihrer energieeffizienten Herstellung vergleichbar sein, zum anderen sollen auch verschiedene Branchen voneinander abgegrenzt werden [226]. Mithilfe von Kennzahlen und Methoden soll somit die Energieeffizienz einer Branche unternehmensintern als auch unternehmensübergreifend dargestellt werden können [123].
- **Praxistauglichkeit:** Zur Gewährleistung einer operativen Anwendbarkeit und die Detektion von tatsächlichen Optimierungs- und Verbesserungspotenzialen für Energieeinsparungen ist eine einfache Integration der Methodik in die Prozesse eines Unternehmens auf allen Ebenen erforderlich. Die Praxistauglichkeit einer Methode impliziert, dass die Erfassung aller erforderlichen Daten mit möglichst geringem Aufwand durchgeführt werden kann. Mithilfe der Kennzahlen oder Methoden müssen die Beziehungen und Abhängigkeiten der verschiedenen Einflussparameter auf die Energieeffizienz nachvollziehbar abgebildet werden. Je komplexer eine Methode oder Kennzahl ist, desto weniger praxistauglich ist sie. Deshalb soll die Energieeffizienz mit einer Methode so einfach wie möglich und so komplex wie nötig dargestellt werden können. [123]

Abgrenzung der erweiterten Anforderungskriterien zu den Grundanforderungen

Die Bezeichnung „Anforderungen an eine Methodik zur Bewertung der Energieeffizienz“ nach Haag [95] impliziert bereits, dass diese Anforderungen lediglich für die Bewertung von Methoden herangezogen werden. Mit diesen Anforderungen wird eine Methode hinsichtlich ihrer Eignung für den prinzipiellen Einsatz zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion untersucht, gibt aber keine Hinweise darüber in welchem Maß Aussagen über die tatsächliche Energieeffizienz daraus hervorgehen. Die „Anforderungen zur Gewährleistung einer übergreifenden Vergleichbarkeit der tatsächlichen Energieeffizienz“ sind in begrenztem Umfang für die Bewertung von Kennzahlen ausreichend. Die Anforderung „Messbarkeit verschiedener Energieformen“ muss lediglich bei der Bewertung von Methoden berücksichtigt werden, da eine Kennzahl keine Aussagen über die Messbarkeit von Energieformen trifft. Eine Kennzahl wird aus Messwerten gebildet und setzt daher die Messung voraus. [61] Das Gleiche gilt für die Anforderung „Konvertierung in ein einheitliches System“.

Kennzahlen müssen jedoch genau wie Methoden eine „Übergreifende Vergleichbarkeit“ der Energieeffizienz gewährleisten. Dementsprechend müssen Vergleiche auf allen Ebenen innerhalb eines Unternehmens sowie branchen- und unternehmensweit möglich sein. Die gemessenen Daten und resultierenden Kennzahlen müssen so umgerechnet werden können, dass sie auf allen Ebenen anwendbar sind und ein aussagekräftiges und vergleichbares Ergebnis liefern, unabhängig von der Stufe im Produktionsprozess. Dafür muss die „Skalierung der Daten und Informationen“ innerhalb einer Methode erfolgen. Kennzahlen bilden lediglich die skalierten Ergebnisse ab. Eine „Diskrete Datenaufnahme“ muss mithilfe einer Methode realisiert werden und ist Voraussetzung für eine Kennzahlenbildung. Da Kennzahlen keine Aussage über die Fähigkeit der „Anbindung an ein Datenmanagementsystem für den Umgang mit Big Data“ besitzen, müssen lediglich Methoden diese Anforderung erfüllen, um aus einer großen und komplexen Menge an Daten Kennzahlen ermitteln und Aussagen über mögliche Einsparpotenziale treffen zu können. Energieumwandlungen und -verluste müssen bereits bei der Messung berücksichtigt werden. Eine Methode beschreibt unter anderem die Vorgehensweise von Messungen und die Berücksichtigung der Einflussfaktoren. Die Anforderung „Berücksichtigung von Energieumwandlungen und -verlusten“ muss daher nur im Rahmen von Methoden berücksichtigt werden und nicht von Kennzahlen selbst. Im Rahmen der Anforderung „Expressive Bewertung der Energieeffizienz“ soll überprüft werden, ob bei der Bestimmung der Energieeffizienz neben dem gemessenen Ist-Wert, auch der minimal einsetzbare Energieeinsatz, der sogenannte Referenzwert, berücksichtigt wird. Da es Kennzahlen gibt, durch die die Energieeffizienz messbar ist, können Aussagen über die „Expressive Bewertung der Energieeffizienz“ demzufolge sowohl im Rahmen von Methoden als auch von Kennzahlen getroffen werden. Die „Anforderungen zur operativen Anwendbarkeit einer Methode zur Energieeffizienzbewertung“ gelten sowohl für Kennzahlen als auch für Methoden. Ziel ist es, die Energieeffizienz eines Produkts hinsichtlich der Herstellung auf allen Ebenen sowie branchenübergreifend mithilfe einer Methode oder Kennzahl vergleichbar zu machen. Deshalb sollen sowohl geeignete Methoden als auch Kennzahlen grundsätzlich auf allen Ebenen anwendbar sein. Neben Methoden sollen auch Kennzahlen bezüglich ihrer „Praxistauglichkeit“ beziehungsweise ihrer Komplexität bewertet werden. Bei der Überprüfung einer Kennzahl ist darauf zu achten, dass hier im Wesentlichen die Kennzahl an sich betrachtet wird und die Nachvollziehbarkeit und Einfachheit bei der Bildung und Berechnung im Vordergrund steht. Die Praxistauglichkeit von Methoden bezieht sich hauptsächlich auf eine einfache Einbindung in ein Unternehmen sowie eine nachvollziehbare und leichte Erfassung aller notwendigen Daten. Nicht alle der vorhergehend aufgeführten Anforderungskriterien eignen sich somit für die Analyse von reinen Kennzahlen. Im Folgenden werden insbesondere die neu definierten Anforderungskriterien zur Gewährleistung einer übergreifenden Vergleichbarkeit und zur operativen Anwendbarkeit zu Grunde gelegt, da durch die Grundanforderungen keine konkreten Handlungsbedarfe abgeleitet werden können.

In Tabelle 6 sind die Bewertungskriterien für Kennzahlen mit zugehöriger Anforderungskategorie im Sinne der Zielstellung für Energieeffizienzkennzahlen aufgelistet.

Tabelle 6: Übersicht der Bewertungskriterien für Kennzahlen und zugehörige Anforderungskategorie

Bewertungskriterien für Kennzahlen	Anforderungskategorie
Übergreifende Vergleichbarkeit	Anforderungen zur Gewährleistung einer übergreifenden Vergleichbarkeit
Expressive Bewertung der Energieeffizienz	
Anwendbarkeit auf Produktebene	Anforderungen zur operativen Anwendbarkeit
Anwendbarkeit auf Prozessebene	
Anwendbarkeit auf Anlagenebene	
Anwendbarkeit auf Werks- oder Abteilungsebene	
Anwendbarkeit auf Standortebene	
Anwendbarkeit auf Unternehmensebene	
Anwendbarkeit auf Branchenebene	
Praxistauglichkeit	

3.2 Die unzureichende Fähigkeit bestehende Kennzahlen und Methoden zur Energieeffizienzbewertung einzusetzen

Zur Nutzenidentifikation werden Energiekennzahlen aus der Fachliteratur, von Unternehmen eingesetzte Kennzahlen bezüglich Energieverbrauch und CO₂-Emissionen sowie quantitative Methoden aus den Bereichen Total Quality Management (TQM), Lean Management und Six Sigma hinsichtlich ihrer Eignung für einen übergreifenden Energieeffizienzvergleich analysiert. [124]

Die Analyse genannter Kennzahlen und Methoden (vgl. Tabelle 23 bis Tabelle 29 im Anhang) lässt folgende Aussagen zum aktuellen Stand der Technik zu [124]:

- Es existiert keine Kennzahl, die das Maß Energieeffizienz eindeutig und aussagekräftig darstellt.
- Es existiert keine Kennzahl, die einen übergreifenden Vergleich der Energieeffizienz zwischen unterschiedlichen Produkten und Herstellprozessen eindeutig ermöglicht.
- Abgeleitete Methoden aus dem Bereich TQM, Lean Management und Six Sigma bieten Potenzial für ein breites Feld der Anwendung, bisweilen aber keine Aussagekraft bzgl. der tatsächlichen Energieeffizienz.
- Kennzahlen bezogen auf Energieeinsatz und Emissionen sind in der Breite anwendbar, bieten aber keine Beurteilungskraft bzgl. der Energieeffizienz.

Herausforderung und Potenziale durch existierende Energiekennzahlen und Methoden die Energieeffizienz expressiv und übergreifend darzustellen

Neben allgemeinen Kennzahlen mit Energiebezug gibt es spezifische Energie- und Effizienzkennzahlen, die in Tabelle 23 im Anhang unter Angabe der Berechnungsformel und der zugehörigen Einheit aufgelistet sind. Die Analyse spezifischer Energiekennzahlen zeigt, dass keine Energiekennzahl existiert, die alle Anforderungen für einen übergreifenden Energieeffizienzvergleich voll und ganz erfüllt. [134] [124] Der „Effizienzgrad“ erweist sich gemäß den Anforderungen als potenzialträchtig. Dieser ist der Quotient aus einem Referenzwert und dem gemessenen Energieverbrauch eines Produktionsprozesses und stellt ein Maß für die Güte des Prozesses dar [67]. Anhand der Energiekennzahl „Equipment Energy Effectiveness (EEE)“ wird die Energieeffizienz im Herstellungsprozess gemessen, da sie Aufschluss darüber gibt, welcher Teil der zugeführten Energie tatsächlich genutzt wird. Sie ist das Verhältnis von wertschöpfender zu aufgenommener Energie und wird durch die Multiplikation des Energienutzungsgrades, des -leistungsgrades und des -qualitätsgrades berechnet. Dadurch werden Verlustanteile durch Ausschuss, Taktverluste sowie Standby- und Stillstandzeiten ersichtlich. Mit der EEE-Kennzahl ist ein branchenübergreifender Energieeffizienzvergleich möglich, jedoch lediglich auf Anlagenebene in Abhängigkeit des Produktionsgutes und dessen festgelegter Produktionskenngrößen, die Energieeffizienz als solches wird hierdurch nicht bemessen. Des Weiteren wurden veröffentlichte Kennzahlen in Bezug auf den Energieverbrauch und CO₂-Emissionen produzierender Unternehmen analysiert. Die Unternehmen sind in Tabelle 24 im Anhang aufgelistet. Prinzipiell ist die Emissionsermittlung auf nahezu allen Unternehmensebenen und für alle Unternehmensbereiche denkbar. Für übergreifende Energieeffizienzvergleiche sind die veröffentlichten Kennzahlen bezogen auf CO₂-Emissionen jedoch völlig ungeeignet. Sie geben keinen Aufschluss über ein Maß an Energieeffizienz. Die Kennzahl „Spezifischer Energieverbrauch“ stellt unter der Rubrik Produktionskennzahlen das größte Potenzial für einen Energieeffizienzvergleich dar. Kennwerte aus Geschäftsberichten und Produktionskennzahlen stellen das Maß der Energieeffizienz jedoch nicht eindeutig dar, sie sind dadurch für einen übergreifenden Vergleich der Energieeffizienz nicht geeignet. Der Begriff „Total Quality Management“ steht für ein umfassendes Qualitätsmanagement [115]. Die Methoden mit dem größten Potenzial aus dem Bereich TQM sind die „Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse“ [31] [30], das „Histogramm“ [149], das „Korrelationsdiagramm“ [149] und die „ServQual-Methode“ [32]. Ein übergreifender Vergleich der Energieeffizienz in der Produktion ist durch reine Übertragung von Methoden aus dem Bereich TQM allerdings nicht möglich. Die „Prozesseffizienz“ als Kenngröße aus dem Bereich Lean Management ist das Verhältnis von wertschöpfender Zeit und Durchlaufzeit. In übertragener Form bietet sie neben der Kennzahl „Equipment Energy Effectiveness (EEE)“ Potenzial, nach spezifischer Erweiterung zur Gewährleistung der genannten Anforderungen, die Energieeffizienz messbar zu beschreiben und zu vergleichen.

3.3 Neukonzeptionierung und Erweiterung bestehender Kennzahlen als Instrument zur Energieeffizienzbewertung

Wie vorausgehend gezeigt, existiert kein Instrument zur übergreifenden Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion. Aus diesem Grund werden die beiden potenzialträchtigsten Ansätze neu konzipiert. Die Energiekennzahl „Equipment Energy Effectiveness“ wird für verschiedene Betrachtungsebenen, die Lean Management Methode „Prozesseffizienz“ um die „Energetische Prozesseffizienz“ erweitert. [123] [124]

Erweiterung der Kenngröße Equipment Energy Effectiveness

Die Kennzahl EEE ermöglicht einen Vergleich der Energieeffizienz nur auf Anlagenebene. Sie ist das Verhältnis von wertschöpfender zu aufgenommener Energie und wird durch die Multiplikation von Energie-Nutzungs-, Energie-Leistungs- und Energie-Qualitätsrate berechnet. [118] Mittels EEE kann nur die Energieeffizienz auf Anlagenebene beurteilt werden. Der erste Ansatzpunkt zur Erweiterung der EEE besteht darin, die auf Anlagenebene festgestellte Energieeffizienz auf Produktebene zu übertragen. Durch Addition der wertschöpfenden Energien und des Gesamtenergieverbrauches aller Anlagen, die an der Herstellung des Produkts beteiligt sind, lässt sich eine erweiterte EEE für die Produktebene berechnen. Jedoch bleibt bei dieser Erweiterung unberücksichtigt, welchen Anteil die jeweilige Anlage an der Herstellung des Produkts hat. Aus diesem Grund wird die anlagenspezifische EEE mit dem Anteil an der Herstellung des Produkts (Anteil Wertschöpfung) multipliziert. Diese erweiterte EEE wird über alle an der Herstellung des Produkts beteiligten Anlagen summiert. Die erweiterte EEE bietet somit einen branchenunabhängigen Vergleich hinsichtlich der Energieeffizienz auf Anlagen- und Produktebene. Durch das top-down-Prinzip kann die EEE auf die Prozessebene projiziert werden. Als Prozess ist die wertschöpfende Transformation während der Durchführung definiert. [233] Eine Anlage kann aus der Verkettung mehrerer Maschinen und mehrerer Prozesse unterschiedlichster Art bestehen. Um die Granularität und somit die Aussagekraft hinsichtlich der Energieeffizienz in Abhängigkeit von Bedarf und Verlusten und dem zurechenbaren Ort des Entstehens zu erhöhen, wird die prozessspezifische EEE als Basis für die erweiterte EEE-Struktur eingeführt. Die anlagenspezifische EEE setzt sich somit aus der Summe der prozessspezifischen EEEs zusammen (siehe Gleichung 1). [204]

$$EEE(Anlage) = \sum_{x=1}^n EEE(Prozess\ x) \quad ; \text{ mit } n \in \mathbb{N} \quad \text{Gleichung 1}$$

Die prozessspezifische EEE wird analog zur anlagenspezifischen EEE durch das Verhältnis der wertschöpfenden Energie zum Gesamtenergieverbrauch berechnet. Die wertschöpfende Energie ist der Gesamtenergieverbrauch abzüglich der Verluste durch Nebenzeiten, Stand-by etc. (*Verluste A*), Wirkungsgradverluste von Maschine und Prozess (*Verluste B*) sowie der Verluste durch Ausschuss und Taktzeitverluste (*Verluste C*).

In Gleichung 2 ist die Berechnungsweise der prozessspezifischen EEE dargestellt.

$$EEE(\text{Prozess}) = \frac{\text{Gesamtenergieverbrauch} - \text{Verluste (A + B + C)}}{\text{Gesamtenergieverbrauch}} \quad \text{Gleichung 2}$$

Die anteilige Zuordnung des Energieverbrauchs und der jeweiligen Verluste an einer Anlage zu den entsprechenden Prozessen stellt die Herausforderung bei der Berechnung der prozessspezifischen EEE dar. Es müssen einerseits geeignete Messeinrichtungen an der Anlage vorhanden sein, um den Energieverbrauch und die Energieverluste exakt den Prozessen zuzuordnen. Andererseits ist diese Ermittlung und Zuordnung der Energieverbräuche und -verluste sehr aufwändig, wodurch diese Erweiterung der EEE an Praxistauglichkeit einbüßt. Eine Skalierung der erweiterten EEE von der Prozessebene über Anlagen- bis zur Produktebene ist durch die gemeinsame Betrachtung aller beschriebenen Erweiterungen möglich (siehe Gleichung 3). [204]

$$EEE(\text{Produkt}) = \sum_{y=1}^n \left\{ \left[\sum_{x=1}^n EEE(\text{Prozess } x) \right] * \text{Anteil Wertschöpfung (Produkt } y) \right\}$$

mit $n \in \mathbb{N}$ Gleichung 3

Eine Aussage über eine standortspezifische Energieeffizienz ist mit der Kennzahl EEE in dieser Form nicht möglich. Eine reine Betrachtung der Energieeffizienz der im Herstellungsprozess verwendeten Anlagen spiegelt nicht die Effizienz eines Standortes, im Sinne eines räumlichen Gebäudes, definiert durch eine vorhandene Gebäudeinfrastruktur, in der sich wiederum Werke, Abteilungen oder andere produzierende Organisationseinheiten befinden können, wider. Neben dem Energieverbrauch, der direkt an den Anlagen anfällt, muss auch die Energie zum Betrieb des Produktionsgebäudes berücksichtigt werden. Folglich berücksichtigt die standortspezifische Energieeffizienz einerseits den Mittelwert aller anlagenspezifischen EEEs an einem Standort, andererseits die Energieeffizienz des Gebäudes. Ein Energieeffizienzwert, der die Effizienz eines Gebäudes hinsichtlich Beleuchtung und Heizung widerspiegelt, ist der sogenannte Energieausweis eines Nichtwohngebäudes, der den Energieverbrauch in Kilowattstunden pro Kubikmeter und Jahr (kWh/m² a) bei konventioneller Nutzung angibt. [112] Die „Gesamtenergieeffizienz“ eines Gebäudes ist nach Definition des Energieausweises umso besser, je weiter sich der angegebene Wert an Null annähert. Einem größeren Wert (heute i.d.R. ein dreistelliger Wert in kWh/m² a) folgt im Umkehrschluss eine Verschlechterung der „Gesamtenergieeffizienz“ des betrachteten Gebäudes [112], weshalb im Folgenden dessen einheitsloser Kehrwert, sowie der Faktor 100 für die kombinierte Berechnung der erweiterten EEEs, aus Gebäude und Anlagenkennwerten herangezogen wird. Dies führt zu einem vergleichbaren, prozentualen Endergebnis < 100%. Die standortspezifische EEE wird durch Multiplikation des Mittelwertes aller an einem Standort in den Herstellungsprozess einbezogenen Anlagen, mit dem

einheitslosen Kehrwert des Energieausweises und mit dem Faktor 100 berechnet (siehe Gleichung 4). Dadurch erfolgt die Bewertung der Standorteffizienz sowohl durch die an dem jeweiligen Standort eingesetzten Anlagen als auch durch spezifische Gebäudekenngrößen an diesem Standort in einer Kennzahl. [204]

$$EEE(\text{Standort}) = \left\{ \frac{1}{x} \left[\sum_{x=1}^n EEE(\text{Anlage } x) \right] \right\} * \frac{1}{\text{Gebäudeeffizienzwert}} * 100$$

mit $n \in \mathbb{N}$

Gleichung 4

Mit der standortspezifischen EEE lässt sich die Energieeffizienz auf Standortebene beurteilen und branchenübergreifend vergleichen. Voraussetzung hierfür ist jedoch die Existenz eines Energieausweises für die zu betrachtenden Gebäude. Ein Vergleich auf Prozess-, Anlagen- und Produktebene ist mit dieser Kennzahl nicht möglich. [124]

Herleitung und Definition der Energetischen Prozesseffizienz

Die Prozesseffizienz gehört zu den Methoden beziehungsweise Kennzahlen aus dem Bereich Lean Management. Sie ist das Verhältnis von wertschöpfender Zeit und Durchlaufzeit. Die Durchlaufzeit ist als Soll-Zeit definiert, welche nötig ist, um eine Aufgabe zu erledigen. [154] Diese setzt sich aus Hauptzeit, Rüst-, Neben- und Verteilzeiten sowie Transport-, Liege- und Wartezeiten zusammen. [79] Durch die zugrundeliegende Systematik der Prozesseffizienz ist eine Abwandlung zur eindeutigen Messung der Energieeffizienz denkbar. Die energetische Prozesseffizienz [123] ist das Verhältnis von wertschöpfender Energie und Energie eines Turnus (siehe Gleichung 5).

$$\text{Energetische Prozesseffizienz} = \frac{\text{Wertschöpfende Energie}}{\text{Energie eines Turnus}} \quad \text{Gleichung 5}$$

mit:

Wertschöpfende Energie = *Energieverbrauch während Produktion*

$$= \text{Gemessener Energieverbrauch der Anlage} - \sum \text{Verluste}$$

Energie eines Turnus = *Energie während Produktion*

+ *Energie für Transporte*

+ *Energie während Liegezeiten und Wartezeiten*

+ *Energie für Rüsten*

+ *Energie während Nebenzeiten und Verweilzeiten*

Die wertschöpfende Energie ist die Energie, welche direkt zur Herstellung eines Produkts aufgebracht werden muss. Zur Ermittlung der wertschöpfenden Energie werden

von der verbrauchten Gesamtenergie die Energieverluste abgezogen. Die Energieverluste beschreiben die an der Anlage gemessenen erforderlichen Energieverbräuche, die an ihr im Betrieb während Transport-, Liege- und Wartezeiten sowie Rüst-, Neben- und Verweilzeiten anfallen. Eine Reduzierung des Energieverbrauchs oder der -verluste impliziert somit eine quantitativ messbare Auswirkung auf die energetische Prozesseffizienz. Bei der Erweiterung der Prozesseffizienz werden zeitliche Verläufe nicht direkt berücksichtigt, jedoch können die jeweiligen Prozesse insoweit abgegrenzt werden, dass zeitliche Veränderungen der energetischen Prozesseffizienz sichtbar werden. Nachteil der Methode ist die fehlende Berücksichtigung der Planungsphase und die Granularität in Form eines differenzierten Bezugs auf Prozess-, Anlagen- oder Standortebene. Abgesehen vom direkten Bezug zu den einzelnen Herstellungsprozessen der Wertschöpfungskette erfüllt diese Methode gut die Anforderungen zur Darstellung der Energieeffizienz auf Produktebene. Allerdings ist die tatsächliche Erfassung der wertschöpfenden Energie als schwierig anzusehen. [123]

3.4 Überblick der Fähigkeitsanalyse bestehende Kennzahlen und Methoden zur Energieeffizienzbewertung einzusetzen

Die Erweiterung des EEEs stellt sowohl auf Produkt-, Prozess- als auch auf Standortebene gegenüber des ursprünglichen EEEs, der sich auf Anlagenebene bezieht, eine Verbesserung dar. Allerdings ist diese Erweiterung weniger praxistauglich, da sie in einem enormen Aufwand resultiert. Die „Energetische Prozesseffizienz“ wird gegenüber der „Prozesseffizienz“ deutlich besser eingestuft, jedoch bleibt die Planungsphase unberücksichtigt. Die Analyse sämtlicher Kennzahlen und Methoden im Detail sind in der Studie „Analyse, Bewertung und Weiterentwicklung von Kennzahlen und Methoden zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion“ [124] unabhängig voneinander erörtert. Es zeigt sich, dass die neu entwickelten und erweiterten Kennzahlen und Methoden für einen Energieeffizienzvergleich gegenüber den ursprünglichen am geeignetsten sind. Es lassen sich Verwendungsfähigkeit und Aussagekraft steigern, dadurch allerdings noch nicht das Maß an Energieeffizienz expressiv und übergreifend vergleichbar darstellen. Einzelne Methoden und Kennzahlen sind eingeschränkt für einen Energieeffizienzvergleich auf bestimmten Betrachtungsebenen anwendbar, jedoch können diese bislang nicht für einen übergreifenden Energieeffizienzvergleich herangezogen werden. Grund dafür ist, dass keine eindeutigen Referenzbezüge vorhanden sind. Es existiert folglich keine Kennzahl oder Methode, mit der ein übergreifender Energieeffizienzvergleich auf allen Betrachtungsebenen möglich ist. Daraus bestätigt sich der Handlungsbedarf, eine Methode zu entwickeln, die alle wesentlichen Anforderungen, insbesondere Referenzwertbezug und Anwendbarkeit auf allen Betrachtungsebenen erfüllt, um somit die wesentlichen Schwachstellen der bereits beschriebenen Kennzahlen und Methoden zu schließen und die Energieeffizienz als solche eindeutig zu definieren und zu bemessen.

4 Der Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz

Wie in der vorhergehenden Fähigkeitsanalyse gezeigt, existiert bis dato kein eindeutiger Referenzwert, der es erlaubt, Kennzahlen und Methoden abzuleiten, um einen Produktionsprozess hinsichtlich seiner Energieeffizienz vergleichbar bewerten zu können. Im Folgenden werden grundlegende energetische Begriffe definiert. Sie bilden im weiteren Verlauf die Grundlagen für Modellvorstellungen zur Beschreibung energetischer Zusammenhänge. Anhand dieser Modelle wird der erforderliche Mindestenergiebedarf zur Durchführung eines Fertigungsverfahrens, als Referenzwert zur Energieeffizienzbewertung erläutert. Die Zielstellung umfasst die vollständige Beschreibung der Fertigungsverfahren der DIN 8580 aus energetischer Sicht, mit Hilfe geeigneter Modelle. Aufbauend auf diesen Modellen kann der erforderliche Mindestenergiebedarf zu deren Durchführung bestimmt werden.

4.1 Grundlagen zur energetischen Beschreibung eines Systems

Die Grundlagen der Thermodynamik determinieren die Gegebenheiten zur Ermittlung des Mindestenergiebedarfs. Auf Basis der Thermodynamik wird das System definiert, innerhalb dessen alle im weiteren Verlauf betrachteten Fertigungsverfahren ablaufen.

- **System:** Darunter versteht man eine Menge an Materie³ oder einen Raumschnitt bestehend aus Systeminhalt, Systemgrenze und Umgebung [147].

Unterschieden wird, wie Abbildung 16 zeigt, zwischen folgenden Formen [147]:

- **Offenes System:** Bei diesem System sind die Systemgrenzen durchlässig für Energie- und Masseströme.
- **Geschlossenes System:** Bei diesem System sind die Systemgrenzen durchlässig für Energie- nicht aber für Masseströme.
- **Abgeschlossenes System:** Bei diesem System sind die Systemgrenzen undurchlässig für Energie- und Masseströme.

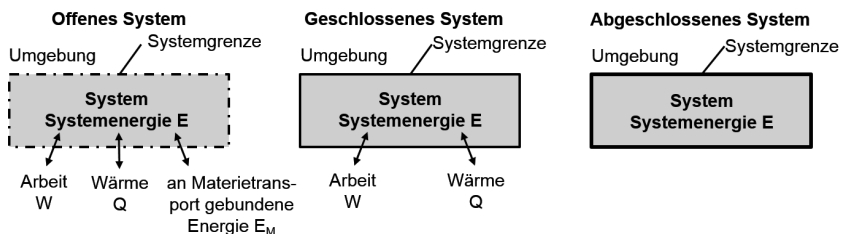


Abbildung 16: Systemgrenzen [215]

³ Der Begriff Materie ist definiert als: „Materie nimmt einen Raum ein und besitzt Masse.“ [20]

Weiterhin wird der Begriff des Zustands eingeführt. Ein System kann einen stabilen, metastabilen oder instabilen Zustand einnehmen, wie Abbildung 17 graphisch zeigt. Ein Zustand lässt sich durch verschiedene Zustandsgrößen beschreiben. Im Folgenden werden die hierfür notwendigen Begriffe definiert:

- **Zustand:** Er charakterisiert ein System durch feste Werte und wird durch physikalische Eigenschaften beschrieben [147].
- **Zustandsgrößen:** Alle physikalischen Eigenschaften, die einen Zustand beschreiben, werden darunter zusammengefasst. Dazu gehören Masse, Volumen, Temperatur, Druck, innere Energie und die Materialkenngrößen [147].
- **Stabiler Zustand:** Das System befindet sich in einem Zustand niedrigster Energie (globales Minimum) und ist zeitlich unveränderlich. Für eine Reaktion muss Energie zugeführt werden [155].
- **Metastabiler Zustand:** Das System befindet sich in einem lokalen Energieminimum. Ausgelöst durch Aktivierungsenergie strebt es nach einem stabilen Zustand [155].
- **Instabiler Zustand:** Das System verändert seinen Zustand unter Energieabgabe [155].

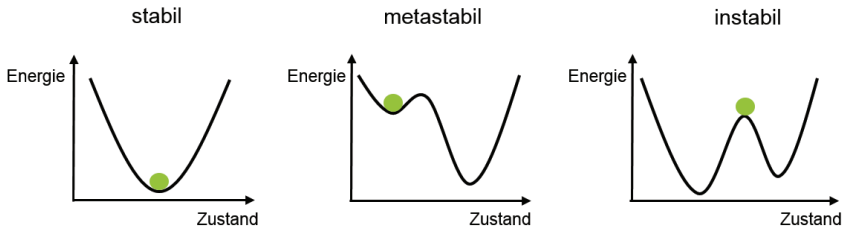


Abbildung 17: Zustandsarten nach [190]

Der Energiezustand eines Systems wird durch seine Systemenergie beschrieben. Die Systemenergie setzt sich aus innerer und äußerer Energie zusammen:

- **Systemenergie:** Sie umfasst die Menge an Energie eines thermodynamischen Gesamtsystems. Die Systemenergie E ist dabei wie folgt definiert [147]:

$$E = E_{kin} + E_{pot} + U$$

Gleichung 6

mit	E_{kin}	kinetische Energie des Gesamtsystems
	E_{pot}	potentielle Energie des Gesamtsystems
	U	innere Energie des Gesamtsystems

- **Äußere Energie:** Sie setzt sich aus der Energie der Bewegung sowie der Lage des Gesamtsystems im Raum zusammen (E_{kin} und E_{pot}) [8].

- **Innere Energie:** Sie wird als Zustandsgröße eines Systems definiert, die im Inneren des Systems gespeichert ist. Nach thermodynamischer Vorstellung liegt sie als Translations-, Rotations- und Schwingungsenergie der Moleküle bzw. Atome vor. Bestimmbar ist die Änderung der inneren Energie ΔU , nicht jedoch deren absoluter Wert [147].

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

Gleichung 7

mit ΔQ Wärmearbeit ΔW Innere Arbeit

Eine weitere energetische Größe ist die Enthalpie. Sie setzt sich zusammen aus der inneren Energie und der Verschiebearbeit:

- **Enthalpie:** Sie bezeichnet die Summe aus innerer Energie und Verschiebearbeit. Die Enthalpie H ist eine Zustandsgröße, da auch ihre Einzelterm Zustandsgrößen sind [153].

$$H = U + p \cdot V$$

Gleichung 8

mit p Druck V Volumen

- **Verschiebearbeit:** Sie muss aufgewendet werden, wenn eine Stoffmenge über Systemgrenzen hinweg transportiert werden soll. Sie ist das Produkt aus Druck und Volumen ($p \cdot V$) [153]. Für Flüssigkeiten und feste Stoffe ist die Verschiebearbeit vernachlässigbar [96].

Mit Hilfe dieser Definitionen lassen sich energetische Abläufe im Allgemeinen modellhaft beschreiben.

4.2 Modellvorstellung und Rahmenbedingungen zur Beschreibung der Existenz eines Mindestenergiebedarfs

In dem folgenden Kapitel wird das Modell der Aktivierungsenergie beschrieben. Im Anschluss daran werden die Rahmenbedingungen zur Übertragung dieses Modells aus energetischer Sicht auf die Fertigungsverfahren der DIN 8580 festgelegt. Darauf aufbauend wird das Modell zur Betrachtung ihres Mindestenergiebedarfs eingeführt.

Das Modell der Aktivierungsenergie als Grundlage zur Beschreibung der Existenz eines Mindestenergiebedarfs

Für die zu entwickelnde Modellvorstellung wird ein Modell aus der Chemie als Grundlage herangezogen. Es handelt sich hierbei um die sog. Aktivierungsenergie. Sie beschreibt die Menge an Energie, die notwendig ist, um eine Reaktion in Gang zu setzen.

Hierbei ist es nicht relevant, ob die Reaktion exotherm oder endotherm abläuft. Bei einer exothermen Reaktion ist dabei die Gesamtenergiebilanz der Reaktion negativ, während sie bei einer endothermen Reaktion positiv ist. Unabhängig von der Gesamtenergiebilanz ist eine Aktivierungsenergie für jede Reaktion zu erbringen [29].

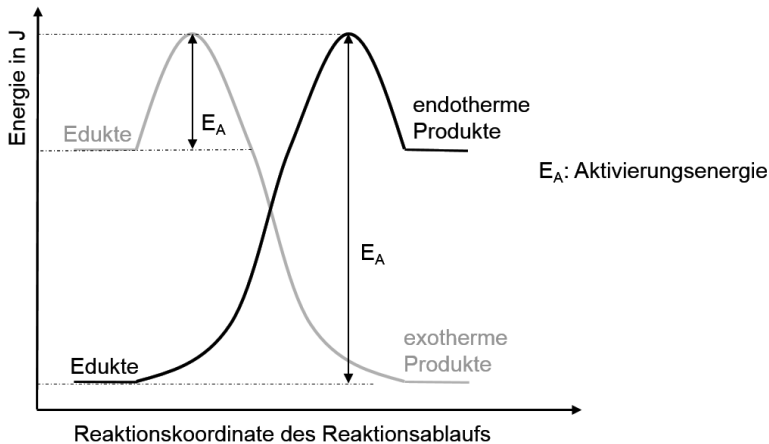


Abbildung 18: Aktivierungsenergie einer chemischen Reaktion [142]

Wie in Abbildung 18 zu erkennen, ist der Betrag der Aktivierungsenergie E_A von der Stabilität des Eingangs- und Endzustands abhängig. Sowohl die energetisch globale Lage der Edukte und Produkte⁴ geben Auskunft über die Stabilität des Zustands, als auch die Höhe der energetischen Barriere, die für die chemische Reaktion überwunden werden muss.

Definition der Rahmenbedingungen zur Übertragung des Modells der Aktivierungsenergie auf Fertigungsverfahren der DIN 8580

Die Theorie der Aktivierungsenergie wird im Folgenden auf die Verfahren der DIN 8580 übertragen. Diese Verfahren sind nach dem Ziel der zu verrichtenden Umwandlung gruppiert. Die Einteilung der DIN 8580 erfolgt nach der Form des Werkstücks und dem Zusammenhalt des Werkstoffes, nicht nach energetischen Aspekten. Für die Betrachtung der Umwandlung unter energetischen Gesichtspunkten wird der Begriff der **Transformation**⁵ eingeführt. Unter Transformation versteht man aus energetischer Sicht einen Umwandlungsvorgang von einem definierten Eingangs- zu einem definierten Endzustand.

⁴ Unter Edukten werden die Ausgangsstoffe bezeichnet, die bei einer chemischen Reaktion eingesetzt werden; als Produkte werden die Stoffe bezeichnet, die durch die Reaktion entstehen [189].

⁵ Der Begriff Transformation bezeichnet im Allgemeinen eine Wandlung. Bei der Produktion von festen Körpern (Stückgütern) beschreibt eine Transformation die Wandlung von Materie. Transformationsprozesse sind in der Fertigungstechnik durch die Verfahren der fertigungstechnischen Hauptgruppen nach DIN 8580 definiert. [230]

Dieser Eingangs- und Endzustand⁶ kann nur in stabiler oder metastabiler Form vorliegen. Um die Theorie der Aktivierungsenergie auf das zu entwickelnde Modell übertragen zu können, werden die Grenzen des zu wandelnden Systems so festgelegt, dass sie für alle Verfahren der DIN 8580 Gültigkeit besitzen.

Für das folgende Modell zur energetischen Bewertung der Verfahren nach DIN 8580 wird von einem **geschlossenen System** ausgegangen (vgl. Abbildung 16). Die **Systemgrenze** wird so festgelegt, dass alle für die Transformation notwendigen Materialien innerhalb dieser Grenze liegen. Unter dem Begriff Materialien werden Rohstoffe⁷, Werkstoffe, Halbzeuge, Bauteile, Baugruppen, Hilfsstoffe⁸ und Betriebsstoffe⁹ zusammengefasst. Da bei einem geschlossenen System lediglich Energie über die Systemgrenzen transferiert werden kann, werden nur die notwendigen Energiebedarfe für eine Transformation der Materialien betrachtet, nicht aber Energiebedarfe für einen Transfer der Materialien in das System. Der Energiebedarf für den Transfer der Materialien in das System spiegelt sich in der äußeren Energie des Systems wider. Für eine Transformation innerhalb der Systemgrenzen eines geschlossenen Systems ist der Anteil der möglichen Änderung an äußerer Energie des Systems nicht relevant. Da der Anteil der äußeren Energie keinen Einfluss auf die Transformation innerhalb des geschlossenen Systems hat, wird er nicht berücksichtigt. Die Änderung der kinetischen bzw. potentiellen Energie einzelner Materialien oder Objekte innerhalb des Systems ist möglich.

Da die innere Energie nicht absolut zu bestimmen ist [147], wird im Zusammenhang mit der Systemenergie immer von deren Änderung gesprochen. Gemäß Gleichung 6 der Systemenergie lässt sich eine Änderung der Systemenergie ΔE ableiten [153]:

$$\Delta E = \Delta E_{kin} + \Delta E_{pot} + \Delta U \quad \text{Gleichung 9}$$

Da die äußere Energie, wie zuvor beschrieben, vernachlässigt werden kann, folgt aus Gleichung 9 [96]:

$$\Delta E = \Delta U \quad \text{Gleichung 10}$$

Das bedeutet, dass die Änderung der Systemenergie der Änderung der inneren Energie des Systems entspricht. Gemäß Gleichung 7 setzt sich die Veränderung der inneren Energie aus innerer Arbeit und Wärmearbeit zusammen. Innere Arbeit kann alle Formen der Arbeit umfassen, welche in Kapitel 5 näher spezifiziert werden.

⁶ Der Eingangs- und Endzustand einer Transformation wird neben thermodynamischen Zustandsgrößen auf makroskopischer Ebene zudem durch die Pose, die Geometrie und die Werkstoffeigenschaften eines Objekts definiert. Auf diese Abhängigkeiten wird in den folgenden Kapiteln zur Ermittlung des Mindestenergiebedarfs auf makroskopischer Ebene detailliert eingegangen.

⁷ Rohstoffe bezeichnen Grundstoffe, die im Produktionsprozess in das Erzeugnis eingehen [230].

⁸ Hilfsstoffe bezeichnen Stoffe, die beim Produktionsprozess in das Erzeugnis eingehen, aber nicht wesentlicher Bestandteil des Erzeugnisses werden [230].

⁹ Betriebsstoffe bezeichnen Stoffe, die ohne selbst in das Erzeugnis einzugehen, zur Durchführung des Produktionsprozesses benötigt werden [230].

Definition des Mindestsystemenergieänderungsbedarfs

Eine chemische Reaktion führt eine Änderung der inneren Energie herbei. Eine Änderung der inneren Energie entspricht aus energetischer Sicht stets einer Transformation. Daher ist für jede Transformation eines Systems eine Aktivierungsenergie notwendig [29]. Diese wird als Mindestsystemenergieänderungsbedarf bezeichnet.

Der **Mindestsystemenergieänderungsbedarf** E_{SM} entspricht der Menge an Energie, die einem System mindestens zugeführt werden muss, um eine Transformation durchzuführen. Der energetische Verlauf einer Transformation ist in Abbildung 19 dargestellt. Sowohl der Eingangszustand (1) als auch der Endzustand (3) liegen immer in einem stabilen oder metastabilen Zustand vor. Zwischen Eingangs- und Endzustand existiert ein instabiler Zustand (2). Die aufzuwendende Energie, um diesen instabilen Zustand zu erreichen, entspricht dem Mindestsystemenergieänderungsbedarf E_{SM} .

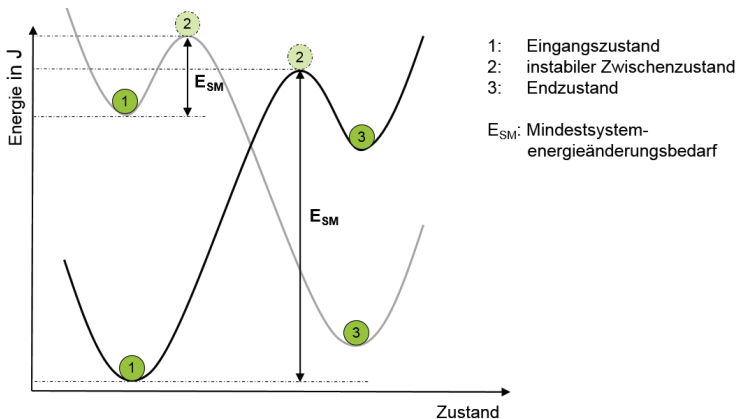


Abbildung 19: Mindestsystemenergieänderungsbedarf E_{SM} in Anlehnung an [142]

Im nächsten Kapitel wird das obige Modell des Mindestsystemenergieänderungsbedarfs bezüglich der Anwendbarkeit für die Verfahren der DIN 8580 dargestellt.

4.3 Modellvorstellungen des Mindestsystemenergieänderungsbedarfs als Referenzwert auf mikroskopischer Ebene

Der Mindestsystemenergieänderungsbedarf für ein Fertigungsverfahren der DIN 8580 lässt sich modellhaft beschreiben. Da die verschiedenen Verfahren auf grundlegend unterschiedlichen physikalischen und chemischen Abläufen basieren, werden für einen Beweis der vollständigen Gültigkeit des zuvor erstellten allgemeinen Modells verschiedene Modellvorstellungen aus anderen Wissenschaftsdisziplinen übernommen. Dazu gehören die Chemie, die Thermodynamik, die Atomphysik und die Werkstoffwissenschaften. Die Spezifizierung des Mindestsystemenergieänderungsbedarfs zur Durchführung eines Fertigungsverfahrens erfolgt auf Basis eines oder einer Kombination der nun folgenden geltenden Modelle.

4.3.1 Das chemische Modell zur Mindestenergiebedarfsbestimmung

Eine chemische Reaktion bezeichnet einen Vorgang, bei dem sich Atome in definierten Zahlenverhältnissen zu Atomverbänden zusammenfügen oder bei dem Atomverbände in Atome getrennt oder in andere Atomverbände umgeordnet werden [113]. Die Begriffe Atom und Molekül sind definiert als:

- **Atom:** Ein Atom ist das kleinste Teilchen eines chemischen Elements [113].
- **Molekül:** Ein Molekül ist ein Materieteilchen, das aus mindestens zwei gleich- bzw. ungleichartigen Atomen besteht (=Atomverband) [113].

Wie im Abschnitt 4.2 erläutert, wird unabhängig von der Gesamtenergiebilanz eine Aktivierungsenergie für jede chemische Reaktion benötigt. In Abbildung 18 ist der Unterschied zwischen der Aktivierungsenergie für endotherme und exotherme Reaktionen aufgeführt. Für alle Fertigungsverfahren, bei denen die Transformation mit Hilfe einer chemischen Reaktion durchgeführt wird, entspricht wie in Abbildung 19 dargestellt, der Mindestsystemenergieänderungsbedarf der Aktivierungsenergie:

E_{SM} = chemische Aktivierungsenergie

Anwendungsfälle zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs durch das chemische Modell sind z.B. das Beizen oder Abscheiden als Fertigungsverfahren aus der DIN 8580.

4.3.2 Das atomphysikalische Modell zur Mindestenergiebedarfsbestimmung

Das atomphysikalische Modell wird zur energetischen Beschreibung der Bindungs- und Trennvorgänge auf mikroskopischer Ebene für die Änderung zwischenatomarer Bindungsarten herangezogen.

Bindungsarten:

Im Allgemeinen unterscheidet man drei zwischenatomare Bindungsarten:

- **Atombindung:** Es teilen sich zwei Nichtmetallatome ein oder mehrere Elektronenpaare und bilden Moleküle [142].
- **Ionenbindung:** Bei dieser Bindungsart gibt ein Metallatom ein oder mehrere Elektronen an ein Nichtmetallatom ab. Die entsprechenden Metallkationen (positiv geladen) und Nichtmetallanionen (negativ geladen) ziehen sich gegenseitig an und bilden ein Ionengitter [142].
- **Metallbindung:** Alle Metallatome geben hierbei ihre Valenzelektronen in die zwischen den Atomen bestehenden Zwischenräume ab. Damit liegen im Metallgitter Bereiche mit positiver Ladungskonzentration, den sog. Atomrümpfen, und Bereiche mit negativer Ladungskonzentration, den sog. Valenzbändern, vor [142].

Valenzelektronen bezeichnen die in einem Atomverband am schwächsten gebundenen Elektronen. Sie sind für die Bindungen zwischen den Atomen verantwortlich. Das

Valenzband stellt den Bereich der frei beweglichen Valenzelektronen dar. Es veranschaulicht die Leitfähigkeit und die Bindungskonstellation der Metalle [179].

Modellvorstellung: Potentialtopf

Bestimmte Verfahren der DIN 8580 bewirken, dass zwischenatomare Bindungen ausgebildet werden. Für die energetische Bewertung dieser Bindungsmechanismen wird auf das Potentialtopfmodell zurückgegriffen. Dies ist in Abbildung 20 als Modellvorstellung für Metallbindungen veranschaulicht.

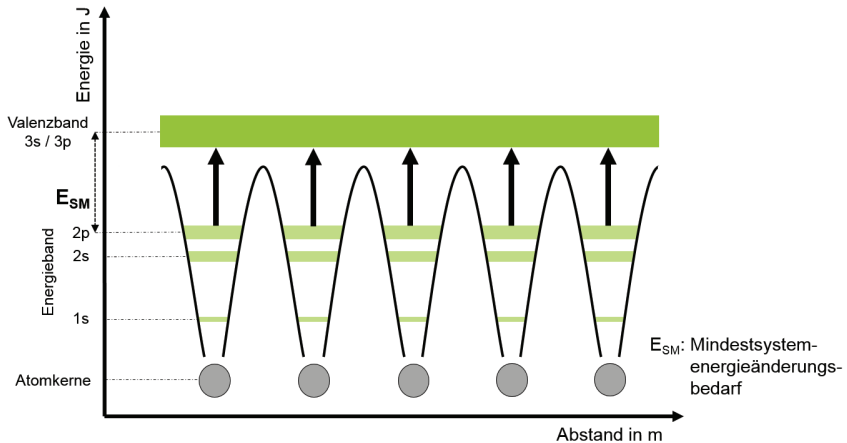


Abbildung 20: Potentialtopfansatz für Metallbindungen in Anlehnung an [191]

Unter einem Potentialtopf versteht man die Region eines lokalen Minimums potentieller Energie. Um die Wände des Potentialtopfes überwinden zu können, muss Energie zugeführt werden [178]. Obwohl die Gesamtenergiebilanz bei Bindungsvorgängen negativ ist, muss stets ein Energiebetrag aufgewendet werden [107]. Damit Metallatome Bindungen ausbilden können, müssen diese Valenzelektronen von einem energetisch niedriger gelegenen Energieband in das höher gelegene Valenzband angehoben werden. Der dafür erforderliche Energiebedarf ist der aufzuwendende Mindestsystemenergieänderungsbedarf E_{SM} . Dieser ist von der Anzahl der zu bindenden Atome abhängig.

Zur Ausbildung von Ionenbindungen müssen Elektronen auf ein höheres Energieniveau gebracht werden, damit sie die Wände des Potentialtopfes des Metallatoms überwinden können.

Anschließend werden sie in den Potentialtopf des Nichtmetallatoms aufgenommen. Im Gegensatz zur Metallbindung gilt für Ionenbindung das in Abbildung 21 gezeigte Modell. Der Energiebedarf zur Anhebung einzelner oder mehrerer Elektronen entspricht dem Mindestsystemenergieänderungsbedarf.

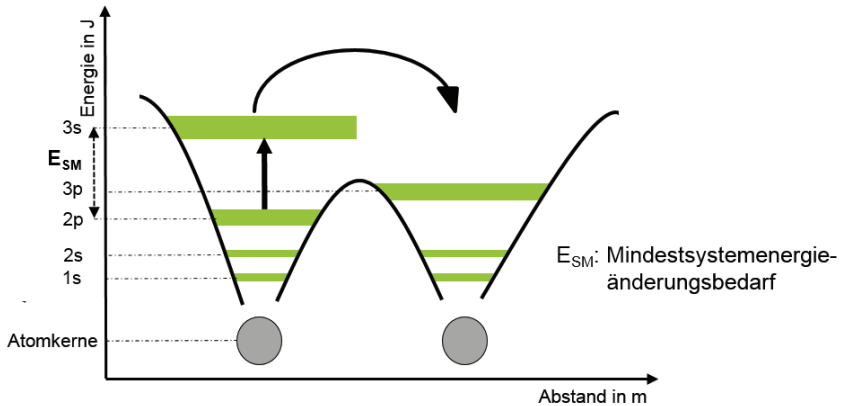


Abbildung 21: Potentialtopfansatz für Ionenbindungen in Anlehnung an [191]

Wie aus den vorangegangenen Modelldarstellungen hervorgeht, entspricht der Mindestsystemenergieänderungsbedarf für die Ausbildung von Metall- und Ionenbindungen der Ionisierungsenergie:

$$E_{SM} = \text{Ionisierungsenergie}$$

Beispielhafte Anwendungsfälle zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs durch den Potentialtopfansatz sind das Pressen und das Sintern als Fertigungsverfahren aus der DIN 8580.

Modellvorstellung: Coulombpotential

Für die energetische Betrachtung von Verfahren der DIN 8580, die auf atomarer Ebene zur Auflösung der zwischenatomaren Bindungen führen, ist ein weiteres Modell erforderlich.

Im Gleichgewichtszustand sind die Atome im Gitter so angeordnet, dass sich die anziehenden, auch Coulombkräfte genannt, und die abstoßenden Kräfte kompensieren. Dieser stellt sich im Gleichgewichtsabstand l_0 zwischen zwei Atomen ein [239]. In diesem Gleichgewichtszustand ist die resultierende Energie aus Abstoßungs- und Coulombenergie minimal, wie in Abbildung 22 zu sehen.

Damit zwei Atome als separiert gelten, muss der Abstand von l_0 auf l_∞ vergrößert werden. Um den Abstand l_∞ einzustellen, muss die Bindungsenergie aufgewendet werden, also die Wirkung der anziehenden Coulombkräfte überwunden werden.

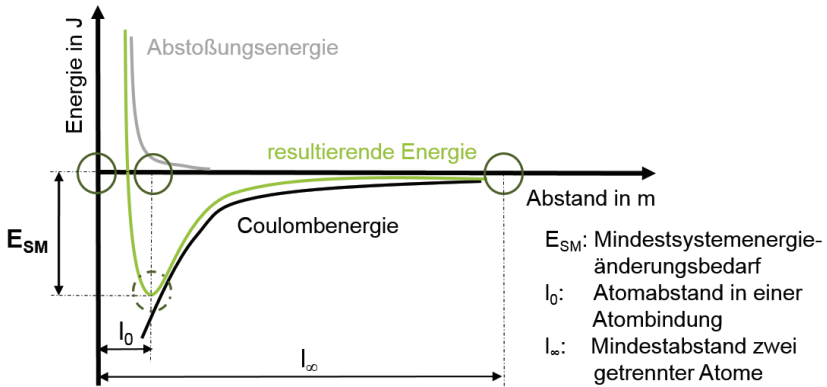


Abbildung 22: Coulombpotential in Anlehnung an [191]

Wie aus Abbildung 22 hervorgeht, entspricht die aufzuwendende Bindungsenergie dem Mindestsystemenergieänderungsbedarf:

$$E_{SM} = \text{Bindungsenergie}$$

Der Bindungsmechanismus zur Ausbildung und Trennung von Atombindungen wird durch das atomphysikalische Modell vollständig erfasst.

Beispielhafte Anwendungsfälle zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs durch den Coulombpotentialansatz sind das Scherschneiden, das Reißen, das Fräsen oder das Bandschleifen als Fertigungsverfahren aus der DIN 8580.

4.3.3 Das thermodynamische Modell zur Mindestenergiebedarfsbestimmung

Auf mikroskopischer Ebene tragen die Schwingungen der Atome zum thermischen Anteil der inneren Energie bei. Eine Wärmezufuhr drückt sich damit in einer höheren mittleren Schwingungsamplitude der Atome aus.

Diese thermische Aktivierung führt zu Veränderungen im Kristallgitter. Aus Sicht der Einzelatome basiert diese Veränderung des Gitters auf den Platzwechseln der einzelnen Atome. Wie in Abbildung 23 zu sehen, muss dafür zunächst eine energetische Schwelle überwunden werden.

Für den Platzwechsel muss die Anziehung der unmittelbaren Nachbarn überwunden und gleichzeitig der erforderliche Raum für den Platzwechsel geschaffen werden. Diese Platzwechsel bilden die Grundlage für eine definierte Gefügeänderung von Eingangs- zu Endzustand. Die zu überwindende Energieschwelle wird als Aktivierungsenergie bezeichnet. Diese hängt vom Kristallgittertyp und der Atomgröße ab [239].

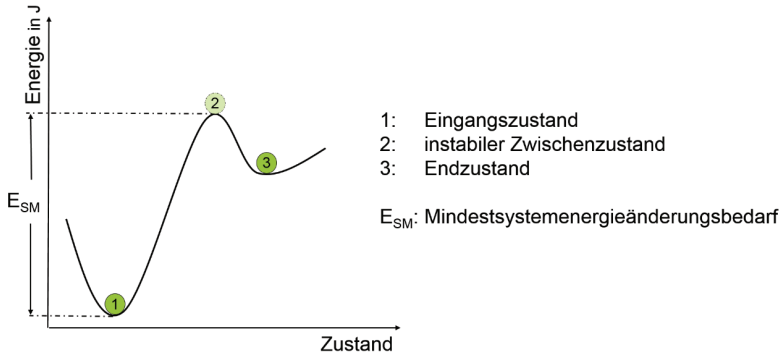


Abbildung 23: Thermodynamisches Modell [9]

Es gibt die Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig. Diese sind charakterisiert nach dem Ordnungsgrad ihrer Teilchen, deren Wechselwirkungen untereinander und deren Beweglichkeit gegeneinander [215]. Findet im Rahmen der Transformation eine Änderung des vorliegenden Aggregatzustands statt, muss zusätzlich zum Energiebetrag zur Erreichung des Temperaturniveaus des Phasenübergangs, die entsprechende Phasenänderungsenthalpie aufgebracht werden. Zu den Phasenänderungsenthalpien gehören die Schmelz-, Verdampfungs-, Sublimations-, Kondensations-, Kristallisations- und Resublimationsenthalpie [16].

E_{SM} = thermische Aktivierungsenergie

Der Mindestsystemenergieänderungsbedarf entspricht somit der thermischen Aktivierungsenergie. Wird der Aggregatzustand im Rahmen einer Transformation geändert, setzt sich die thermische Aktivierungsenergie aus einer Mindestwärmemenge und der entsprechenden Phasenänderungsenthalpie zusammen [239].

Beispielhafte Anwendungsfälle zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs durch das thermodynamische Modell sind das Anlassen, das Schmelzverbindungs-schweißen und das Schwerkraftgießen als Fertigungsverfahren aus der DIN 8580.

4.3.4 Das werkstoffwissenschaftliche Modell zur Mindestenergiebedarfsbestimmung

Das werkstoffwissenschaftliche Modell wird zur energetischen Beschreibung von Umformvorgängen auf mikroskopischer Ebene herangezogen. In Abbildung 24 wird das Modell anhand eines Idealkristalls dargestellt. Unter einem Idealkristall versteht man eine Kristallstruktur mit keinerlei Abweichungen vom regelmäßigen Gitteraufbau. In einem Idealkristall drückt sich die Umformung durch das gegenseitige Verschieben von Gitterebenen aus. Soll die Lage der Atome einer Gitterebene relativ zu den Atomen einer benachbarten Gitterebene verändert werden, muss Energie aufgewandt werden.

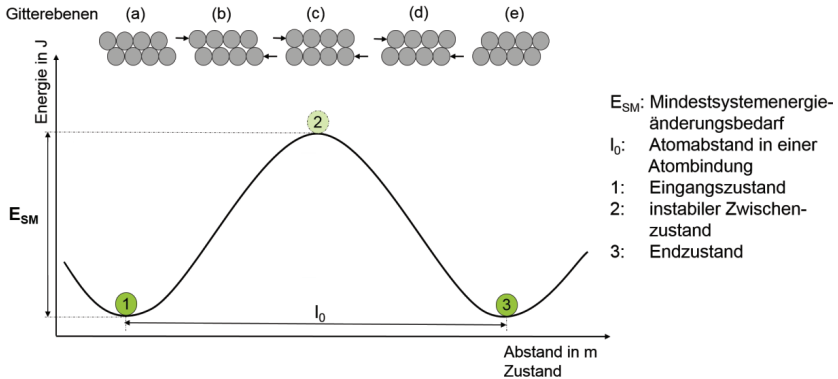


Abbildung 24: Werkstoffwissenschaftliche Modellvorstellung für Idealkristalle [239]

Im Eingangszustand (a) liegt ein stabiler Zustand vor, der durch Zuführung von Energie in einen instabilen Zustand (c) überführt wird. Dafür ist mindestens der Betrag an Energie E_{SM} erforderlich, um die kritische Schubspannung¹⁰ zu erreichen. Abschließend stellt sich wieder ein stabiler Zustand (e) ein. Das heißt, das Gitter wurde plastisch verformt. Der Übergangsbereich (b) von Zustand (a) zu Zustand (c) entspricht einer elastischen Verformung. Das bedeutet, wird keine weitere Energie zugeführt, so kehren die Atome der Gitterebene in Zustand (a) zurück. Bei plastischer Verformung entspricht die mikroskopische Lage der Atome untereinander tatsächlich genau ihrer Ausgangslage vor der Einwirkung der Energie. Mit Hilfe der obigen Abbildung kann ein Zusammenhang zu Abläufen auf mikroskopischer Ebene hergestellt werden. Ein detailliertes Verständnis aller Phänomene eines Umformprozesses kann auf der Basis eines Idealkristalles nicht erreicht werden [239]. In einem Realkristall existieren Gitterdefekte. Unter Gitterdefekten werden alle Abweichungen von einem idealen Gitter bezeichnet. Diese werden in der Werkstoffkunde als Versetzungen¹¹, Einschlüsse, Stapelfehler und Korngrenzen beschrieben [107].

Die Versetzungen sind die Träger einer plastischen Verformung. Aufgrund von Gitterfehlern können sich diese Versetzungen nicht frei bewegen und dadurch entstehen Eigenspannungen im Kristallgitter. Nach einer Umformung weisen deshalb Kristallgitter einen veränderten Zustand innerer Energie auf [239]. In Abbildung 25 wird der Verlauf der inneren Energie während eines Umformvorgangs für Realkristalle deutlich.

¹⁰ Die kritische Schubspannung bezeichnet den Betrag der Schubspannung, ab der Atomschichten abgleiten [191].

¹¹ Als Versetzungen bezeichnet man linienhafte Gitterstörungen, deren Bewegung in Gleitebenen die mikroskopische Abgleitung und damit die makroskopische Verformung bewirken [111].

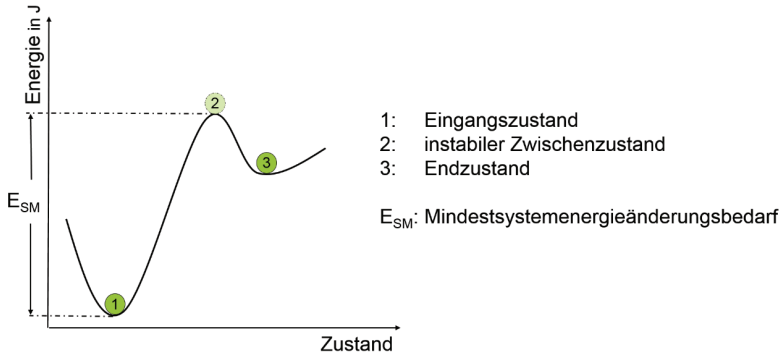


Abbildung 25: Werkstoffwissenschaftliches Modell in Anlehnung an [9]

Für den Fall der plastischen Verformung eines Realkristalls ist der Eingangszustand 1 die oben beschriebene Ausgangslage (a). Der instabile Zustand 2 entspricht dem Übergang von elastischer zu plastischer Verformung. Um diesen zu erreichen, ist ein Mindestsystemenergieänderungsbedarf E_{SM} aufzubringen:

E_{SM} = Energie zur Überwindung der „kritischen Schubspannung“

Dieser Zusammenhang gilt für alle Umformverfahren mit dem Ziel einer plastischen Verformung. Beispielhafte Anwendungsfälle zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs durch das werkstoffwissenschaftliche Modell für plastische Verformungen sind das Verfestigen durch Walzen, das Tiefziehen, das Gesenkformen und das Durchdrücken als Fertigungsverfahren aus der DIN 8580.

Der Mindestsystemenergieänderungsbedarf für elastische Verformungen unterscheidet sich von dem der plastischen Verformung. Für elastische Verformungen entspricht der Eingangszustand 1 in Abbildung 25 dem entspannten Zustand. Um den instabilen Zustand 2 zu erreichen, muss eine Vorspannenergie¹² aufgewandt werden. Endzustand 3 ist der resultierende, vorgespannte, stabile Gleichgewichtszustand.

E_{SM} = Vorspannenergie

Für diesen Fall entspricht der Mindestsystemenergieänderungsbedarf E_{SM} der aufzubringenden Vorspannenergie. Beispielhafte Anwendungsfälle zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs durch das werkstoffwissenschaftliche Modell für elastische Verformungen sind das Klemmen, das Schrauben und das Einspreizen von Federn als Fertigungsverfahren aus der DIN 8580.

¹² Die Vorspannenergie ist die Energie in Höhe der Arbeit die benötigt wird um eine Vorspannkraft aufzubringen [15].

4.4 Gültigkeitsbereich der Werkstoffe

Lässt sich das Verhalten eines Werkstoffes im Rahmen einer Transformation auf die beschriebenen Modellvorstellungen zurückführen, ist es möglich den dafür erforderlichen Mindestenergiebedarf zu bestimmen. Hierfür werden die in der Fertigungstechnik am häufigsten eingesetzten Werkstoffgruppen, Metall, Kunststoff sowie Glas und Keramik charakterisiert und bewertet.

4.4.1 Metall

Die maßgebende Werkstoffeigenschaft zur Abgrenzung der Metalle gegenüber den Nichtmetallen ist die elektrische Leitfähigkeit. Diese liegt bei Metallen deutlich über der elektrischen Leitfähigkeit anderer Werkstoffe. Eine Sonderstellung nehmen die sogenannten Halbleiter ein. Die elektrische Leitfähigkeit ist hier vorhanden, dennoch werden sie nicht den Metallen zugeordnet [111]. Bei Metallen liegt eine Metallbindung vor. Der atomare Aufbau eines Metalls ist geprägt durch eine räumliche Anordnung der Metallatome in einer Gitterstruktur. Das kubisch-flächen-zentrierte, das kubisch-raum-zentrierte sowie das am dichtesten gepackte hexagonale Gitter sind für die üblicherweise eingesetzten metallischen Werkstoffe die am häufigsten vorliegenden Gitterstrukturen. (vgl. Abbildung 26)

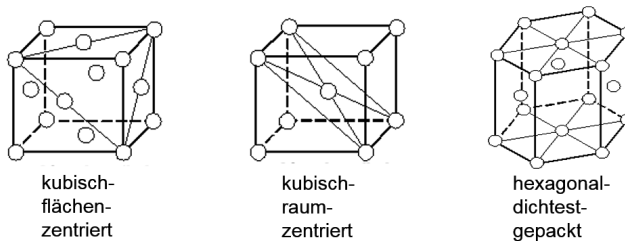


Abbildung 26: Elementargitterstrukturen Metall [239] [157]

Die energetische Bewertung bei der Verarbeitung von Metallen lässt sich je nach Verfahren auf die vorweg beschriebenen Modelle zurückführen. Alle Modelle können zum Einsatz kommen.

4.4.2 Kunststoff

Unter Kunststoffen versteht man alle synthetisch hergestellten hochpolymeren Stoffe. Kunststoffe bestehen aus langen, verschlauften bzw. verzweigten Makromolekülen, welche auf Basis chemischer Reaktionen ausgebildet werden [111]. Die Moleküle gehen im Gegensatz zu den Metallatomen keine Metallbindungen, sondern kovalente chemische Bindungen ein. Zusätzlich wirken zwischen den einzelnen Makromolekülen zwischenmolekulare Bindungskräfte und es kann zu Vernetzungsreaktionen kommen. Innerhalb der Gruppe der Kunststoffe gibt es weitere Klassifizierungen aufgrund des Vernetzungsgrades der Makromoleküle. So werden, wie in Abbildung 27 gezeigt,

Elastomere, Duroplaste und Thermoplaste unterschieden. Die thermoplastischen Kunststoffe werden wiederum nach ihrer Struktur in amorph oder teilkristallin unterteilt.

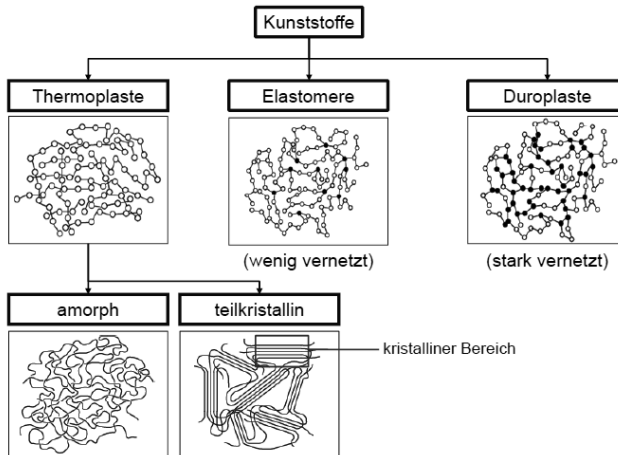


Abbildung 27: Einteilung der Kunststoffe [62]

Die energetischen Zusammenhänge für die Verarbeitung von Kunststoffen lassen sich, je nach Verfahren, auf genau eines der beschriebenen Modelle zurückführen. Das oben genannte werkstoffwissenschaftliche Modell zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs kommt bei der Verarbeitung von Kunststoffwerkstoffe nicht zum Einsatz.

4.4.3 Glas und Keramik

Keramische Werkstoffe sind als anorganische, nichtmetallische Werkstoffe definiert. Darunter werden Materialien verstanden, deren Struktur durch kovalente und/oder heteropolare Bindungen charakterisiert, und nicht organisch ist. Die Werkstoffgruppe Glas und Keramik wird unterteilt in Kristalle, Keramik, anorganische Gläser und anorganische Bindemittel [198] [109]. Die am häufigsten eingesetzten Werkstoffe aus dem Bereich Glas und Keramik sind Stoffe wie Fensterglas, Oxidkeramiken, nichtoxidische Keramiken, Graphit oder Zement [111]. Die technischen Keramiken bilden vergleichbar mit metallischen Werkstoffen einen Gitterverbund aus. Den Bindungsmechanismus bilden hierbei kovalente, chemische oder Ionenbindungen. Die zum Teil sehr hohe Festigkeit keramischer Werkstoffe kommt von der hohen Anzahl an Korngrenzen. Glas wird ebenso als unterkühlte Flüssigkeit bezeichnet. Das bedeutet: Wird eine Schmelze sehr schnell abgekühlt, kann sich kein Gitter ausbilden und die amorphe Struktur bleibt auch im erstarrten Zustand erhalten. In der Anwendung werden häufig sogenannte Glaskeramikwerkstoffe eingesetzt. Hierbei wird das Glas durch Wärmebehandlung gezielt nachkristallisiert, um die Eigenschaften zu steuern. So entstehen Gläser mit teilkristallinen Keramikstrukturen. Der Unterschied ist in Abbildung 28 zu sehen.

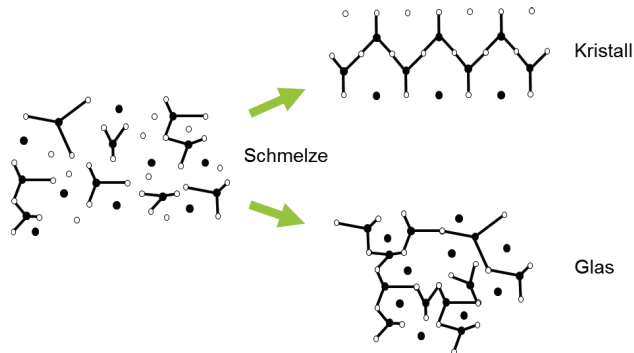


Abbildung 28: Struktur von Glas [196]

Zur energetischen Bewertung der Verarbeitung von Glas- und Keramikwerkstoffen gelten wiederum alle entwickelten Modellvorstellungen. Die Anwendung des werkstoffwissenschaftlichen Modells zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs kommt nicht zum Einsatz, da bei den entsprechenden Fertigungsverfahren der DIN 8580, die sich dieser Modellvorstellung bedienen, Glas und Keramik nicht verarbeitet werden. In der folgenden Abbildung 29 wird der Zusammenhang zwischen der Anwendbarkeit der Modellvorstellungen auf die jeweiligen Werkstoffgruppen deutlich.

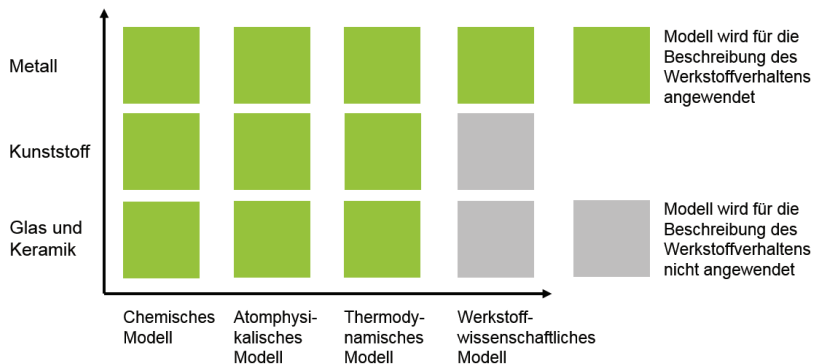


Abbildung 29: Anwendbarkeit der entwickelten Modellvorstellungen für die unterschiedlichen Werkstoffgruppen

Wie der Abbildung 29 entnommen werden kann, können die unterschiedlichen Modelle zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs für die energetische Beschreibung der Verarbeitung der verschiedenen Werkstoffgruppen herangezogen werden. Lediglich das werkstoffwissenschaftliche Modell zur Beschreibung des Mindestenergiebedarfs findet bei der Betrachtung von Kunststoffen sowie Gläsern und Keramiken keine Anwendung, denn dieses Modell beschreibt Vorgänge, die nur bei der Verarbeitung metallischer Werkstoffe gelten.

5 Übertragung des Modells des Mindestenergiebedarfs von der atomaren auf die makroskopische Ebene

Innerhalb dieses Kapitels werden eingangs grundlegende Begrifflichkeiten der Werkstoffkunde definiert. Darauf aufbauend wird die Gültigkeit der auf mikroskopischer Ebene entwickelten Modellvorstellungen des E_{SM} auf die makroskopische Ebene überführt. Auf dieser Basis wird ein Referenzwert zur Energieeffizienzbewertung auf makroskopischer Ebene abgeleitet und definiert.

5.1 Eigenschaften makroskopisch eingesetzter Werkstoffe

Die Überleitung der modellhaften atomaren Zusammenhänge hin zu einer makroskopischen Betrachtungsweise der Materialien erfordert die Definition folgender Begriffe:

- **Werkstoff:** Werkstoffe sind Materialien, die aus Rohstoffen oder Substanzen durch spezielle Verfahrens- und Produktionsprozesse aufbereitet wurden. Werkstoffe werden im Allgemeinen zu Halbzeugen, Bauteilen, Baugruppen sowie Betriebs- und Hilfsstoffen weiterverarbeitet [10].
- **Werkstoffeigenschaft:** Darunter versteht man physikalische, chemische und technologische Eigenschaften eines Werkstoffes. Mit Hilfe von Werkstoffkenngrößen können die meisten dieser Werkstoffeigenschaften beschrieben werden [10].
- **Werkstoffkenngröße:** Sie bezeichnet eine messbare Werkstoffeigenschaft, die das mechanische, technologische, thermische, optische, elektrische, magnetische, chemische oder elektrochemische Verhalten festlegt [207].
- **Werkstoffkennwert:** Dieser entspricht dem Zahlenwert der Werkstoffkenngröße, der in einem genormten Versuch bestimmt wird [207].

Die in den nächsten Kapiteln relevanten Werkstoffkenngrößen, die zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs in Abhängigkeit des jeweiligen Verfahrens erforderlich sind, werden wie folgt definiert:

- **Elastizitätsmodul:** Der E-Modul beschreibt den Zusammenhang zwischen der aufgetragten Spannung und der elastischen Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers [34].
- **Schubmodul:** Der Schubmodul bezeichnet das Verhältnis aus Schubspannung und zulässiger elastischer Schubverformung [34].
- **Festigkeit:** Unter Festigkeit versteht man den mechanischen Widerstand, den der Werkstoff der mechanischen Verformung oder Trennung entgegensetzt. Die mechanische Einwirkung kann mittels Zug, Druck, Biegung, Scherung oder Torsion geschehen [10].

- **Bruchfestigkeit:** Darunter versteht man die Grenzspannung, die zum Bruch des Werkstoffs führt. Je nach Belastungsrichtung unterscheidet man zwischen Zug-, Druck-, Biege-, Scher- und Torsionsfestigkeit [10].
- **Streckgrenze:** Die Streckgrenze charakterisiert den Übergang vom elastischen zum plastischen Spannungszustand bei einachsigen Zugversuchen und kann aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramm abgelesen werden [209].

Unter Anwendung dieser definierten Begriffe erfolgt die Überleitung des E_{SM} von der mikroskopischen auf die makroskopische Ebene. Dies geschieht durch die Herleitung der Werkstoffkenngrößen auf Basis der dargestellten Modellvorstellungen.

5.2 Herleitung makroskopischer Werkstoffkenngrößen zur Ermittlung des Mindestenergiebedarfs auf Basis der mikroskopischen Modellvorstellungen

Das folgende Kapitel beinhaltet die Übertragung der auf mikroskopischer Ebene entwickelten Modellvorstellung des E_{SM} auf die makroskopische Ebene. Diese Ableitung dient als Basis zur energetischen Beschreibung der Transformation tatsächlich eingesetzter Werkstoffe auf makroskopischer Ebene.

Die Übertragung der Modellvorstellungen des Mindestenergiebedarfs geschieht anhand geltender physikalischer und chemischer Gesetzmäßigkeiten, unter Einbezug spezifisch ermittelter und fundierter Werkstoffkennwerte.

5.2.1 Herleitung des Mindestenergiebedarfs für chemische Verfahren auf Basis der Aktivierungsenergie

Die **Aktivierungsenergie** E_A für eine chemische Reaktion lässt sich mittels der Arrhenius-Gleichung ermitteln [163]:

$$E_A = R \cdot \ln \left(\frac{k_2}{k_1} \right) \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \quad \text{Gleichung 11}$$

mit R	universelle Gaskonstante
$T_{1/2}$	Reaktionstemperaturen
$k_{1/2}$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante bei $T_{1/2}$ (versuchsmäßig über die Reaktionsgeschwindigkeit und die Stoffkonzentration ermittelt)

Die Arrhenius-Gleichung stellt die einzige Möglichkeit dar, die Aktivierungsenergie für chemische Vorgänge aus den versuchsmäßig ermittelten Reaktionsgeschwindigkeiten mathematisch hinreichend genau zu berechnen.

Liegen bereits Versuchsauswertungen für die konkrete Reaktion in der Literatur vor, kann direkt auf diese zurückgegriffen werden. Die übliche Größenordnung für Aktivierungsenergien chemischer Reaktionen liegt im Bereich von 60 bis 250 kJ/mol [163]. Sie ist somit abhängig von der molaren Masse eines Stoffes.

Aus energetischer Sicht gibt es in der Chemie keine Unterscheidung von Verfahrensabläufen zwischen mikroskopischer und makroskopischer Ebene. Es gilt mikroskopisch wie makroskopisch das eingangs beschriebene Modell der Aktivierungsenergie zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs.

5.2.2 Herleitung des Mindestenergiebedarfs für thermische Prozesse auf Basis der spezifischen Wärmekapazität

Die Aktivierungsenergie für thermisch aktivierte Vorgänge in Form einer Wärmemenge lässt sich rechnerisch ebenfalls über die Arrhenius-Gleichung (Gleichung 11) ermitteln [111]. Die dafür notwendigen Reaktionsgeschwindigkeiten sind empirisch durch Versuche bestimmbar.

Auf Basis des Temperaturverlaufs kann in Abhängigkeit des Werkstoffs dessen spezifische Wärmekapazität ermittelt werden. Die spezifische Wärmekapazität beschreibt die Wärmemenge, die aufgewendet werden muss, um ein Kilogramm eines Werkstoffes um ein Kelvin zu ändern [212]. In Folge des erforderlichen Temperaturniveaus für eine Wärmebehandlung (Zieltemperatur) sowie der werkstoffspezifischen Wärmekapazität lässt sich die erforderliche thermische Aktivierungsenergie makroskopisch als **Wärmemenge Q** beschreiben [215]:

$$Q = c \cdot m \cdot (T_1 - T_0)$$

Gleichung 12

mit	c	spezifische Wärmekapazität
	m	Masse
	T_1	Zieltemperatur
	T_0	Ausgangstemperatur

Für thermisch aktivierte Vorgänge, bei denen zudem der Aggregatzustand geändert wird, muss zusätzlich die entsprechende Enthalpie für die Phasenänderung eingebracht werden. Diese umfasst die Schmelz-, Verdampfungs-, Sublimations-, Kondensations-, Kristallisations- und Resublimationsenthalpie [16].

Bei Schmelzvorgängen steigt die Temperatur bei Erhitzung bis zum Schmelzpunkt stetig an. Obwohl weiterhin Wärme zugeführt wird, erhöht sich die Temperatur nicht, während der Werkstoff schmilzt.

Diese dafür benötigte Wärmemenge lässt sich aus der spezifischen Schmelzenthalpie, auch spezifische Schmelzwärme genannt, berechnen [93]. Somit entspricht diese Wärmemenge der Aktivierungsenergie für Schmelzvorgänge.

Dieser Zusammenhang gilt analog für alle Enthalpieformen. Der formelmäßige Zusammenhang für die **Wärmemenge** Q der Phasenänderung ist definiert als [75]:

$$Q = q \cdot m \qquad \text{Gleichung 13}$$

mit q spezifische Wärmekapazität für die
Aggregatzustandsänderung

Zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs kann deshalb auf makroskopischer Ebene auf die Formen der Wärmekapazität eines Werkstoffs zurückgegriffen werden.

5.2.3 Herleitung des Mindestenergiebedarfs für Trennvorgänge auf Basis der Bruchfestigkeit

Für das atomphysikalische Modell ist die Bestimmung des E_{SM} nicht unmittelbar von der mikroskopischen auf die makroskopische Betrachtungsebene übertragbar.

Um die atomphysikalische Modellvorstellung von der mikroskopischen Ebene auf die makroskopische Ebene zu übertragen, muss ein Zusammenhang zwischen der mikroskopischen Größe, der Bindungsenergie (die dem E_{SM} entspricht), und den makroskopischen Größen, das heißt den charakteristischen Werkstoffkenngrößen, hergestellt werden. Hierfür wird zunächst der Elastizitätsmodul (E-Modul) über das Coulombpotentialmodell rechnerisch abgeschätzt. Der formelmäßige Zusammenhang zwischen dem **E-Modul** E und atomspezifischen Parametern ist wie folgt definiert [78]:

$$E = \frac{n \cdot m \cdot U_0}{r_0^3} \qquad \text{Gleichung 14}$$

mit U_0	Bindungsenergie
r_0	Atomabstand
n	Hauptquantenzahl ¹³
m	magnetische Quantenzahl ¹⁴

¹³ Die Hauptquantenzahl beschreibt die Situation des Energieniveaus der Elektronen eines Atoms. [74]

¹⁴ Die magnetische Quantenzahl beschreibt den magnetischen Drehimpuls eines Atoms. [74]

Wie in Gleichung 14 zu sehen ist, lässt sich der E-Modul mit Hilfe der Bindungsenergie und dem Atomabstand bestimmen. Er hängt nur von der Art der Atome, jedoch nicht von der Gefügestruktur ab.

Aufgrund dieses Zusammenhangs kann der E-Modul bereits auf mikroskopischer Ebene gut abgeschätzt werden, im Gegensatz zu Werkstoffkenngrößen, welche die Festigkeit beschreiben.

Für Stahlwerkstoffe wird die Aussage über die Abhängigkeit der Werkstoffkenngrößen von den Gefügestrukturen deutlich. Der E-Modul für Ferrit, Martensit, Bainit und Austenit ist identisch, wohingegen sich die Bruchfestigkeit unterscheidet [194].

Die charakteristische Werkstoffkenngröße für Trennvorgänge ist die theoretische Festigkeit. Unter Zuhilfenahme des Coulombpotentialmodells lässt sich die theoretische Festigkeit rechnerisch abschätzen.

Das Ergebnis der Abschätzung zeigt, dass die theoretische Festigkeit zwischen 1/15 und 1/8 des E-Moduls liegt. Allerdings befinden sich die empirisch ermittelten Werte eines bestimmten Werkstoffs in einem Bereich zwischen 1/1000 und 1/100 des E-Moduls [89]. Damit ist die versuchsmäßig bestimmte Festigkeit des Werkstoffs niedriger als die theoretisch ermittelte Festigkeit.

Die Abweichung lässt sich durch die in der theoretischen Herleitung nicht berücksichtigten Gitterdefekte erklären, welche Spannungsüberhöhungen hervorrufen. Das führt zu einer richtungsabhängigen Verringerung der Festigkeit. Für makroskopisch verwendete Werkstoffe sind daher die in genormten Versuchen empirisch ermittelten Werkstoffkenngrößen Zug-, Druck-, Biege-, Scher- und Torsionsfestigkeit anzusetzen, die in Summe als Bruchfestigkeit eines Werkstoffes bezeichnet werden.

5.2.4 Herleitung des Mindestenergiebedarfs für die Verformung von Metallen auf Basis der kritischen Schubspannung

Um für das zuvor beschriebene werkstoffwissenschaftliche Modell zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs eine direkte Beziehung des E_{SM} zwischen der mikroskopischen Modellebene und der makroskopischen Anwendungsebene aufzustellen, ist ein direkter Zusammenhang zwischen den charakteristischen Werkstoffkenngrößen erforderlich.

Hierzu wird ein Zusammenhang zwischen dem **E-Modul** E , der sowohl für die mikroskopische als auch makroskopische Beschreibung der Werkstoffeigenschaften gleich ist [78] (gemäß Gleichung 14) und dem **Schubmodul** G hergestellt [59]:

$$G = \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)} \cdot E \quad \text{Gleichung 15}$$

mit ν Querkontraktionszahl

Mit Hilfe des so ermittelten Schubmoduls wird eine rechnerische Abschätzung der kritischen Schubspannung bzw. der **Fließspannung** τ vorgenommen, die nach der Modellvorstellung dem E_{SM} entspricht [107]:

$$\tau = \frac{G \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot a} \qquad \text{Gleichung 16}$$

mit **a** vertikaler Atomabstand
 b horizontaler Atomabstand

Gemäß Gleichung 16 lässt sich die kritische Schubspannung mittels mikroskopisch ermittelter Größen berechnen.

Allerdings zeigt sich beim Vergleich dieser Abschätzung mit den empirisch bestimmten Werten der kritischen Schubspannung, dass die errechneten Werte eines bestimmten Werkstoffs um den Faktor 10 bis 10^4 zu hoch liegen.

Die lokalen Spannungen in einem Werkstoff sind daher nicht gleich den makroskopisch abgeschätzten Spannungen. Tatsächlich eingesetzte Werkstoffe auf makroskopischer Ebene sind weit weniger belastbar als rechnerisch abgeschätzt. Ursächlich für diese Abweichungen sind wiederum die im realen Gitter vorliegende Defekte. Diese Gitterdefekte führen zu lokalen Spannungsüberhöhungen im Werkstoff. Die lokalen Spannungsüberhöhungen sind die Ursache der hohen Spannbreite für das Verhältnis zwischen der empirisch bestimmten und der errechneten kritischen Schubspannung. Diese Gitterdefekte führen zu einer Verminderung der kritischen Schubspannung [107].

Das bedeutet, dass für den Übergang von elastischer zu plastischer Verformung im Realkristall eine niedrigere Spannung erforderlich ist. Die kritische Schubspannung ist diejenige Spannung, die notwendig ist, um den Bereich der Streckgrenze zu erreichen [94].

Zur energetischen Beschreibung des Verhaltens makroskopisch eingesetzter Werkstoffe bei Umformvorgängen, wird die mittels genormter Versuche bestimmte Streckgrenze herangezogen. Auf Basis der Streckgrenze lässt sich so auf makroskopischer Ebene der Mindestenergiebedarf werkstoffspezifisch ermitteln.

Der Mindestenergiebedarf soll für die Bearbeitung eines realen Werkstoffes auf makroskopischer Anwendungsebene als Referenzwert zur Energieeffizienzbewertung dienen.

Dazu wird im folgenden Kapitel gezeigt, in welcher Form der Mindestenergiebedarf aufgebracht werden kann, und durch welchen formelmäßigen Zusammenhang sich der Mindestenergiebedarf für den Anwendungsfall quantifizieren lässt.

5.3 Ableitung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs als Referenzwert auf makroskopischer Ebene

Im Folgenden wird dargestellt, wie der E_{SM} auf makroskopischer Ebene aufgebracht werden kann. Anschließend werden Begrifflichkeiten definiert, um die mikroskopische von der makroskopischen Betrachtungsweise abzugrenzen. Auf Basis dieser Abgrenzung wird der Zusammenhang zwischen dem E_{SM} und dem grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarf E_{GM} als Referenzwert auf makroskopischer Ebene definiert.

Formen von Energie und Arbeit zur Aufbringung des E_{SM}

Der Mindestsystemenergieänderungsbedarf E_{SM} entspricht dem mindestens erforderlichen Energiebetrag zur Umsetzung einer Transformation. Eine Transformation bedingt stets eine Änderung der inneren Energie des Systems.

Gemäß Gleichung 7 setzt sich die Änderung der inneren Energie aus Wärmearbeit und innerer Arbeit zusammen. Energie ist definiert als die Fähigkeit eines Systems Arbeit zu verrichten. Energie kann in den folgenden Erscheinungsformen auftreten [220]:

- chemische Energie
- Kernenergie
- thermische Energie
- mechanische Energie
- elektrische Energie
- Strahlungsenergie

Alle diese Energieformen sind unter idealen Bedingungen verlustfrei ineinander umwandelbar. Diese Umwandlung wird durch die, zur jeweiligen Energieform zugehörige Arbeit realisiert.

Die innere Arbeit und die Wärmearbeit aus Gleichung 7 lassen sich durch mindestens eine spezielle Form oder eine Kombination der genannten Arbeiten beschreiben. Aufgrund des Energieerhaltungssatzes ist eine Kombination der genannten Arbeitsformen möglich.

Im Folgenden werden die einzelnen Arten der Arbeit zur Aufbringung des E_{SM} charakterisiert [220]:

Chemische Arbeit wird nur bei biologischen Prozessen erbracht. Hierzu zählen Stoffwechselvorgänge, Photosynthese sowie die Schaffung und Aufrechterhaltung aller wichtigen chemischen Komponenten der lebenden Zelle [1].

Da die Fertigungsverfahren der DIN 8580 biologische Prozesse nicht betrachten, ist hier die Aufbringung des E_{SM} mittels chemischer Arbeit ausgeschlossen. Die Aktivierungsenergie für Fertigungsverfahren mit chemischen Vorgängen kann thermisch, mechanisch, elektrisch und strahlungstechnisch aufgebracht werden.

Nukleare Arbeit, abgeleitet von der Kernenergie, wird nur im Rahmen von kernphysikalischen Abläufen betrachtet. Darunter versteht man die Kernreaktionen Kernfusion und Kernspaltung [242]. Diese Vorgänge sind ebenfalls nicht Bestandteil der Fertigungstechnologien der DIN 8580.

Aufgrund der Nichtbetrachtung chemischer und nuklearer Arbeit gibt es folgende Möglichkeiten die für den E_{SM} notwendige Arbeit aufzubringen:

Tabelle 7: Möglichkeiten zur Aufbringung des E_{SM}

Thermische Arbeit	Mechanische Arbeit	Elektrische Arbeit	Strahlungstechnische Arbeit
$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$	$W = F \cdot s$	$W = U \cdot Q_{EL}$	$E = h \cdot f$
$Q = q \cdot m$			

Wie aus Tabelle 7 hervorgeht, sind vier grundlegenden Arten der Arbeit zur Erbringung des E_{SM} zu unterscheiden. Diese umfassen thermische, mechanische, elektrische und strahlungstechnische Arbeit.

Unter dem Begriff der mechanischen Arbeit sind alle spezifischen Erscheinungsformen mechanischer Arbeit zusammengefasst. Auf den Zusammenhang der mechanischen Arbeit zwischen Kraft und Weg lassen sich alle Formen der mechanischen Arbeit zurückführen, wie beispielsweise die Hubarbeit oder die Beschleunigungsarbeit.

Wird der E_{SM} durch thermische Arbeit erbracht, so ist der formelmäßige Zusammenhang gemäß Gleichung 12 heranzuziehen.

Für den Fall einer Änderung des Aggregatzustands ist die aufzubringende Wärmemenge Q mittels Gleichung 13 zu berechnen. Muss für die Änderung des Aggregatzustands zunächst die dafür erforderliche Temperatur erreicht werden, müssen Gleichung 12 und Gleichung 13 wie folgt kombiniert werden [215]:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T + q \cdot m$$

Gleichung 17

Die Aufbringung des E_{SM} durch thermische Arbeit bezieht sich nicht nur auf das in Abschnitt 4 beschriebene thermodynamische Modell.

Durch thermische Arbeit lässt sich, aufgrund der Wandlungsfähigkeit, auch der Mindestsystemenergieänderungsbedarf für die anderen entwickelten Modellvorstellungen aufbringen.

Wird der E_{SM} mittels mechanischer Arbeit W aufgebracht, so wird die folgende formelmäßige Beziehung zugrunde gelegt [97]:

$$W = F \cdot s \quad \text{Gleichung 18}$$

mit **F** mechanische Kraft
 s Weg

Die Zusammensetzung von mechanischer Kraft und Weg muss abhängig von den Fertigungsverfahren der DIN 8580 betrachtet werden. Dabei lässt sich jede Form der mechanischen Arbeit mit Hilfe physikalischer Gesetzmäßigkeiten auf Gleichung 18 zurückführen. Wie bereits für die thermische Arbeit beschrieben, bezieht sich die mechanische Arbeit zum Aufbringen des E_{SM} nicht auf eine konkrete Modellvorstellung aus Abschnitt 4, sondern findet prinzipiell für alle Modelle Anwendung.

Eine weitere Möglichkeit den E_{SM} aufzubringen, stellt die elektrische Arbeit W dar. Diese ist definiert als [97]:

$$W = U \cdot Q_{EL} \quad \text{Gleichung 19}$$

mit **U** elektrische Spannung
 Q_{EL} elektrische Ladung

Weiterhin kann der E_{SM} mittels strahlungstechnischer Arbeit E erbracht werden [97]:

$$E = h \cdot f \quad \text{Gleichung 20}$$

mit **h** Plancksches Wirkungsquantum
 f Frequenz einer elektromagnetischen Welle

Mit Hilfe der in diesem Kapitel beschriebenen Arten der Arbeit, können alle Mindestsystemenergieänderungsbedarfe für die in der DIN 8580 erfassten Fertigungsverfahren ermittelt werden.

Für eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Fertigungsverfahren, können diese energetischen Zusammenhänge anhand der verfahrensabhängigen Gegebenheiten spezifiziert werden.

Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als makroskopischer Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz

Für die konsistente Beschreibung der energetischen Zusammenhänge auf makroskopischer Ebene wird im Folgenden der Begriff der Grundoperation eingeführt.

Unter einer **Grundoperation**¹⁵ (**GOP**) versteht man einen grundlegenden Vorgang zur Durchführung einer Transformation, der sich auf Basis physikalischer und chemischer Gesetzmäßigkeiten energetisch beschreiben lässt. Dieser Vorgang lässt sich nicht mehr weiter untergliedern.

Durch eine Grundoperation lässt sich ein Vorgang zur Umsetzung eines Fertigungsverfahrens energetisch beschreiben, unabhängig von der gewählten Produktionsmethode und der eingesetzten Maschinen. Die Durchführung einer Transformation kann durch mindestens eine oder einer Kombination aus mehreren Grundoperationen energetisch beschrieben werden. In Tabelle 8 sind die Grundoperationen, welche im folgenden Kapitel näher erläutert werden, zur energetischen Beschreibung von Fertigungsverfahren der DIN 8580 aufgeführt.

Tabelle 8: Grundoperationen zur Beschreibung von Fertigungsverfahren

1. Drücken	6. Schmelzen	11. Ionisieren
2. Ziehen	7. Verdampfen	12. Verbrennen
3. Biegen	8. Sublimieren	13. Magnetisieren
4. Scheren	9. Thermisches Aktivieren	14. Pose ändern
5. Tordieren	10. Chemisches Aktivieren	15. Vorspannen

Um auf makroskopischer Ebene den Mindestenergiebedarf für eine Grundoperation quantitativ zu erfassen, wird folgend der Begriff des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs definiert.

Der **grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf** E_{GM} entspricht der Mindestenergiemenge, um aus makroskopischer Sicht eine Transformation durchzuführen. Der E_{GM} lässt sich auf den auf mikroskopischer Ebene hergeleiteten E_{SM} zurückführen. Mit Hilfe des E_{GM} wird unter energetischen Gesichtspunkten die mikroskopische von der makroskopischen Ebene begrifflich eindeutig abgegrenzt. Der E_{GM} muss

¹⁵ Eine Operation ist definiert als: „(...) wissenschaftlich nachkontrollierbares Verfahren; nach bestimmten Grundsätzen vorgenommene Prozedur (...)“ [176]; eine Grundoperation kann nicht mehr weiter in andere Operationen unterteilt werden; eng.: operation; in Anlehnung an Grundoperation; eng.: unit operation; Der Begriff Grundoperation ist definiert als: „Tätigkeit beim Ablauf physikalischer Vorgänge, welche nicht mehr weiter in unterschiedliche Tätigkeiten gegliedert werden kann; sie beschreibt die Wandlung irgendeiner physikalischen Größe, ohne Angabe, welche Größe in welche andere gewandelt werden soll.“ [120] Durch die Grundoperation wird die grundlegende physikalische oder chemische Operation beschrieben, welche für den Transformationsvorgang eines Eingangs- zum Endmaterial erforderlich ist. Sie charakterisieren den reinen Wandlungsprozess bei Ausführung eines Verfahrens.

durch eine oder eine Kombination der in Tabelle 8 aufgeführten Arten der Arbeit aufgebracht werden, um makroskopisch eine Transformation in Gang zu setzen.

In Abbildung 30 wird nochmals die Abgrenzung zwischen dem E_{SM} auf mikroskopischer und dem E_{GM} auf makroskopischer Ebene veranschaulicht.

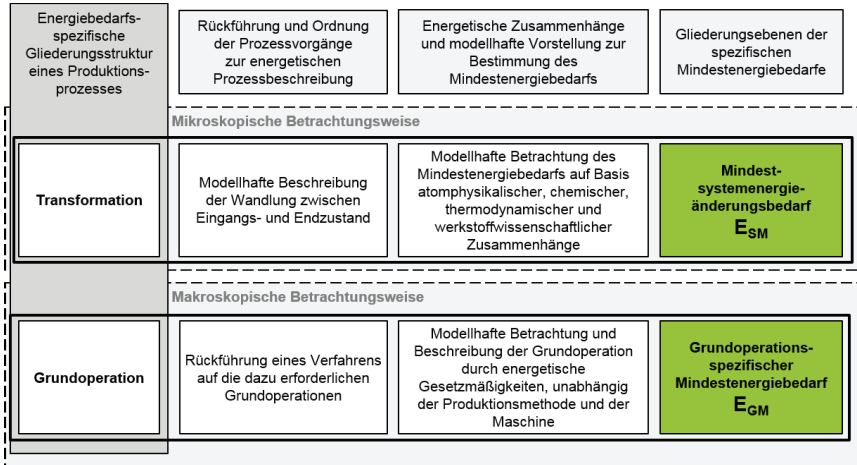


Abbildung 30: Beziehung zwischen E_{SM} und E_{GM}

Bei der Betrachtung auf mikroskopischer Ebene und den dazugehörigen Modellvorstellungen wird stets von einem idealen Werkstoff ausgegangen. Ein idealer Werkstoff ist ein Reinkristall ohne Gitterdefekte.

Tatsächlich kommen jedoch ideale Werkstoffe bei der makroskopischen Verarbeitung nur in Ausnahmefällen zum Einsatz. Aufgrund der Imperfektion makroskopisch eingesetzter Werkstoffe lassen sich, wie im vorhergehenden Kapitel gezeigt, die auf mikroskopischer Ebene ermittelten Ergebnisse für die entsprechenden Werkstoffkennwerte nicht direkt übertragen.

Die Fachliteratur sowie empirisch ermittelte Werkstoffkennwerte für ideale und tatsächlich eingesetzte Werkstoffe auf makroskopischer Ebene, bestätigen diese Diskrepanz. Die makroskopische Betrachtungsweise bezieht sich daher auf tatsächlich eingesetzte Werkstoffe im Anwendungsfall, unter Einbeziehung ihrer Gitterdefekte. Folgender Zusammenhang lässt sich außerdem noch festhalten: liegt auf makroskopischer Ebene ein idealer Werkstoff vor, dann entspricht der E_{GM} betragsmäßig dem E_{SM} .

In den vorhergehenden Kapiteln wurde gezeigt, dass sich ein Mindestenergiebedarf für eine Transformation durch verschiedene Modelle darstellen und beziffern lässt. Im Folgenden wird diese Annahme auf Basis geltender Naturgesetzmäßigkeiten in Form einer allgemeinen Beweisführung manifestiert.

5.4 Logische Begründung für die Bestimmbarkeit des Mindestenergiebedarfs auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten

Die Existenz eines spezifischen Mindestenergiebedarfs für die Durchführung einer definierten Transformation bei festgelegten Umgebungsverhältnissen beruht auf grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der Physik:

- I. Energie ist definiert als die Fähigkeit Arbeit zu verrichten. Zur Ausführung einer Transformation ist Arbeit zu verrichten. Daraus folgt, dass für die Verrichtung einer Transformation Energie aufzuwenden ist [72].
- II. Wenn Energie in Form einer Menge darstellbar ist, ist diese unabhängig von Raum und Zeit zur Verrichtung einer spezifischen Arbeit aufzuwenden [102].
- III. Wenn Materialkenngrößen konstant sind oder sich definiert in Relation zu eingebrachter Kraft, Temperatur sowie dem Ort der Ausführung einer Transformation verhalten, muss für eine spezifische Transformation von einem Eingangszustand zu einem Endzustand eine spezifische Energie aufgewendet werden [167].
- IV. Wenn ein Material, definiert durch seine spezifischen Materialkenngrößen, an einem bestimmten Punkt in Folge eines Energieeintrags eine Zustandsänderung erfährt, muss abhängig vom Eingangszustand ein spezifischer Energiebetrag erforderlich sein, um diesen Punkt der Zustandsänderung zu erreichen und die Änderung hervorzurufen [167].
- V. In einem definierten System, in dem der Energieerhaltungssatz Gültigkeit besitzt [22], lässt sich Energie weder erzeugen noch vernichten, sondern nur wandeln. Unter idealen Bedingungen geschieht diese Wandlung verlustfrei [221].
- VI. Sind für ein Material spezifische Materialkennwerte bekannt [22], so ist eine spezifische Kraft für eine zu verrichtenden Transformation erforderlich. Auf Basis dieser spezifischen Kraft lässt sich der erforderliche Energiebedarf zur Verrichtung dieser Transformation unter Berücksichtigung des Weges beschreiben [167]. Mechanische Arbeit ist definiert als das Produkt aus Kraft und Weg [72]. Sind Eingangs- und Endposition für die Durchführung einer Transformation bekannt, so lässt sich ein definierter kürzester Weg beschreiben.
- VII. Wird für eine geplante Transformation ein Eingangszustand bei festgelegten und gleichbleibenden Umgebungsverhältnissen definiert, ist auf Basis der Differenz der zu verändernden Objektparameter zwischen Eingangs- und Endzustand der mindestens erforderliche Betrag an Energie bis zum Erreichen des durch die geplante Transformation definierten Endzustandes ermittelbar.

Die Möglichkeit hieraus den Mindestenergiebedarf für eine Grundoperation zur Beschreibung einer Transformation abzuleiten, ist in folgender Tabelle als Gegenüberstellung der Anforderung zu geltenden Axiomen naturwissenschaftlicher Gesetzmäßigkeiten abgebildet:

Tabelle 9: Anforderungen und Axiome zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs für eine Transformation auf Basis einer Grundoperation

Bedingungen zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs	Grundsätze der Energiebedarfsermittlung
Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten.	Energieerhaltungssatz Definition des Begriffs Energie Erster Hauptsatz der Thermodynamik
Energie ist wandelbar.	Energieerhaltungssatz Grundsätze der Thermodynamik Goldene Regel der Mechanik
Energie entspricht der Menge einer geleisteten Arbeit oder eines auf eine Masse bezogenen Arbeitsvermögens (Enthalpie).	Energieerhaltungssatz Definition des Begriffs Energie Erster Hauptsatz der Thermodynamik
Materialkennwerte und Kenngrößen sind konstant oder obliegen einem definierten Verhalten bei definierten Umgebungsbedingungen.	Physikalische Gesetze beschreiben allgemeine und wesentliche Zusammenhänge in der Natur, die bei definierten Umgebungsbedingungen stets wirken.
Die zur Durchführung einer Grundoperation erforderliche Arbeit lässt sich unter idealem Zustand unabhängig von Raum und Zeit durch eine definierte Art von Energie beschreiben.	Energieerhaltungssatz: „Arbeit ist mechanisch übertragbare Energie.“
Eine Transformation lässt sich durch genau eine Grundoperation, oder eine Kombination von Grundoperationen, unabhängig von Methode, Werkzeug und Maschine darstellen.	Transformationen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 lassen sich durch Grundoperationen darstellen, für die ein spezifischer Energiebedarf ermittelt werden kann.
Zur genauen Überführung eines Objekts durch eine Grundoperation im Rahmen einer Transformation von einem definierten Eingangszustand in einen definierten Endzustand ist ein genauer Betrag an Energie mindestens erforderlich, der nicht unterschritten werden kann.	Energieerhaltungssatz „Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet werden, sie wird unter idealen Bedingungen verlustfrei gewandelt.“

Daraus folgt: Gelten die beschriebenen Gesetzmäßigkeiten und sind Eingangs- und Endzustand bei bestimmten Umgebungsverhältnissen und Positionsreferenzen definiert, so lässt sich ein spezifischer Energiebedarf für eine spezifische Transformation ermitteln. Dieser spezifische Energiebedarf entspricht dem Mindestenergiebedarf, der bei idealen Bedingungen für die Durchführung einer bestimmten Transformation mindestens aufgebracht werden muss. Sind für den Eingangszustand geltende Bedingungen hinsichtlich Umgebung und Position definiert und als Systemdefinition festgelegt, so ist für eine von diesem Punkt aus startende Transformation bis zum genauen Erreichen eines definierten Endzustandes ein Mindestenergiebedarf erforderlich, der unter idealen Bedingungen nicht unterschritten werden kann.

Somit gilt: Lässt sich eine Transformation im Zuge eines geplanten Produktionsprozesses auf eine Grundoperation zurückführen, so lässt sich auf Basis energetischer Beziehungen für deren Durchführung ein spezifischer Mindestenergiebedarf unter idealen Bedingungen ermitteln. Zusätzlich muss zur Berechnung des Mindestenergiebedarfs die Rückführbarkeit auf ein Modell zur Beschreibung des Mindestenergiebedarfs möglich sein. Wird darüber hinaus der Transformationsnullpunkt als räumliche Ausgangsbasis und Referenz festgelegt, so sind die kürzesten für eine Transformation erforderlichen Wege definiert. Auf Basis dieser Festlegungen für den Ausgangspunkt lässt sich in Folge der Informationen über die geplanten Grundoperationen, das zu transformierende Material, dessen Werkstoffkenngrößen sowie Eingangs- und Endzustand unter idealen Bedingungen, ein zur Transformation mindestens erforderlicher Energiebedarf bestimmen. Wird der in der Produktion übliche Normzustand nach DIN 1343 als Ausgangsbasis und Referenzbezug für die Umgebungsbedingungen festgelegt, so sind Materialkenngrößen nach den Gesetzmäßigkeiten der Naturwissenschaften definiert. Die Voraussetzungen zur Berechenbarkeit des Mindestenergiebedarfs sind in der Anforderungsfolge in Abbildung 31 graphisch dargestellt:

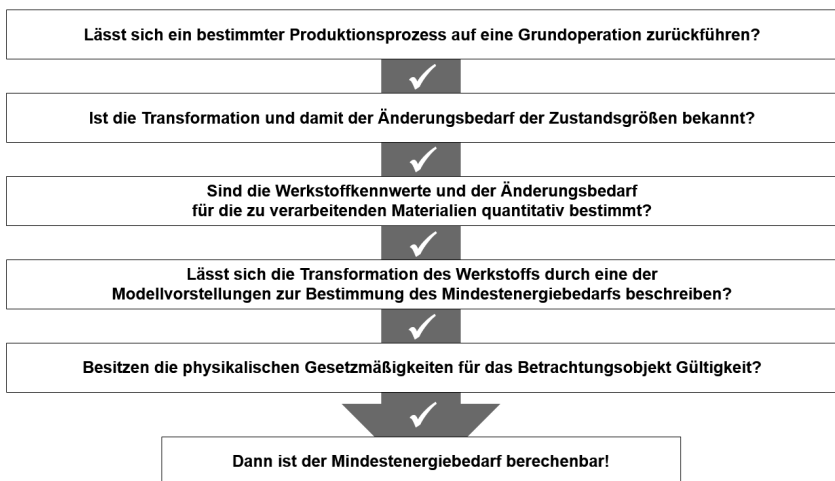


Abbildung 31: Anforderungen zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs

Somit manifestiert sich das Postulat: Sind die Bedingungen zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs erfüllt, die Werkstoffkennwerte und die Zustandsänderungen im Rahmen der Transformation quantifiziert, und lässt sich außerdem eine Transformation eines Werkstoffs auf eines der dargestellten Modellvorstellungen zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs zurückführen, so lässt sich ein Mindestenergiebedarf hierfür quantitativ bestimmen.

6 Der Mindestenergiebedarf als Referenz zur Energieeffizienzbewertung von Fertigungsverfahren der DIN 8580

Im folgenden Kapitel wird das Vorgehen zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs für die Ausführung von Fertigungsverfahren nach der DIN 8580 beschrieben.

Hierfür werden für die Hauptgruppen der einzelnen Fertigungsverfahren die zugehörigen Grundoperationen (GOP) und der Kennwert grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf (E_{GM}) spezifiziert und erläutert. Sie dienen als Kenngrößen zur energetischen Beschreibung eines Fertigungsverfahrens und zur Berechnung des dafür erforderlichen Mindestenergiebedarfs.

6.1 Übersicht der Grundoperationen zur energetischen Beschreibung von Fertigungsverfahren der DIN 8580

Zur Bestimmung der Mindestenergiebedarfe auf makroskopischer Ebene lassen sich Transformationen der Fertigungstechnik durch verfahrensunabhängige Grundoperationen beschreiben. Entsprechend den Arbeiten von Taylor und Gilbraith lassen sich Prozesse bis hin zu ihren einzelnen Arbeitsschritten und -vorgängen aufschlüsseln.

Analog zu dieser Vorgehensweise lässt sich eine Transformation aus energetischer Sicht in Form der notwendigen auszuführenden Grundoperationen darstellen [14]. Gemäß der Definition einer **Grundoperation** versteht man darunter einen grundlegenden Vorgang zur Durchführung einer Transformation. Dieser Vorgang kann nicht mehr weiter in unterschiedliche Vorgänge untergliedert werden. Die Grundoperation beschreibt einen Transformationsvorgang unabhängig der gewählten Produktionsmethode im Sinne eines Verfahrens¹⁶ und der zur Ausführung erforderlichen Werkzeuge und Maschinen.

Die Darstellung der energetischen Zusammenhänge erfolgt entsprechend der Definition unabhängig einer spezifischen Produktionsmethode und Maschine. Lässt sich ein Produktionsprozess für die Durchführung einer Transformation auf eine oder eine Kombination entsprechender Grundoperationen zurückführen, so ist für diesen der erforderliche Mindestenergiebedarf bestimmbar.

Im Folgenden sind die Grundoperationen zur Beschreibung der Fertigungsverfahren der DIN 8580 definiert. Der energetische Zusammenhang zur Ermittlung der erforderlichen Arbeit zur Ausführung der spezifischen Grundoperationen ist als Übersicht in der Tabelle 10 dargestellt.

¹⁶ Ein Verfahren ist definiert als: „Festgelegte Art und Weise, eine Tätigkeit (...) auszuführen“ [90]. Ein Verfahren beschreibt die Art, eine Sache auf eine bestimmte Art mit einer bestimmten Methode zu bearbeiten, es definiert die Methode zur Ausführung eines Prozesses. Häufig wird der Begriff Verfahren und Methode synonym verwendet. Es charakterisiert den Wandlungsprozess eines Körpers durch ein spezifisches Fertigungsverfahren unabhängig der zur Ausführung notwendigen Maschine. [90] [235]

Die 15 benannten Grundoperationen aus Kapitel 5.3 lassen sich generell in vier Gruppen gliedern. Neben den mechanischen, den thermodynamischen und den chemischen Grundoperationen existieren noch einige Sonderformen.

Die folgenden fünf Grundoperationen lassen sich auf die Grundarten der „mechanischen Beanspruchung“ zurückführen [243]. Sie werden somit als Gruppe der **mechanischen Grundoperationen** zusammengefasst. Die Beschreibung der Wirkungsrichtung bezieht sich auf die in Abbildung 32 gezeigten Darstellungen und Achsen.

- GOP 1 Drücken:** Die Aufbringung von Kräften mit dem Ziel der Druckbelastung. Hierbei wirken die äußere Kräfte in Richtung der Bauteilachse und verringern den Gitterabstand [23].
- GOP 2 Ziehen:** Die Aufbringung von Kräften mit dem Ziel der Zugbelastung. Hierbei wirken äußere Kräfte in Richtung der Bauteilachse und vergrößern den Gitterabstand [23].
- GOP 3 Scheren:** Die Aufbringung von Kräften mit dem Ziel der Scherbelastung. Hierbei wirken die äußeren Kräfte senkrecht zur Bauteilachse [23].
- GOP 4 Biegen:** Die Aufbringung von Kräften mit dem Ziel der Biegebelastung. Hierbei ergeben die äußeren Kräfte ein Kräftepaar und eine Querkraft. Das Kräftepaar wirkt in einer durch die Bauteilachse laufende Ebene [23].
- GOP 5 Tordieren:** Die Aufbringung von Kräften mit dem Ziel der Torsionsbelastung. Hierbei ergeben die äußeren Kräfte ein Kräftepaar. Dieses wirkt in einer rechtwinklig zur Bauteilachse stehenden Ebene [23].

In der folgenden Abbildung 32 wird der Unterschied der verschiedenen mechanischen Beanspruchungsarten und der Bezug auf die Bauteilachse nochmals deutlich:

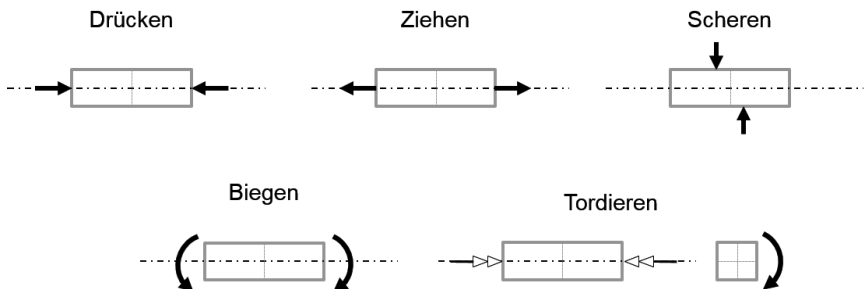


Abbildung 32: Wirkrichtung der mechanischen Beanspruchungsarten [243]

Die folgenden vier Grundoperationen lassen sich auf thermodynamische Wirkprinzipien zurückführen. Sie werden aufgrund ihrer Wirkungsweise als die sogenannten **thermodynamischen Grundoperationen** zusammengefasst:

GOP 6 Schmelzen: Unter Schmelzen versteht man den Übergang eines Stoffes von dem festen in den flüssigen Aggregatzustand [205].

GOP 7 Verdampfen: Unter Verdampfen versteht man den Übergang eines Stoffes von dem flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand [205].

GOP 8 Sublimieren: Unter Sublimieren versteht man den Übergang eines Stoffes von dem festen in den gasförmigen Aggregatzustand [205].

GOP 9 Thermisches Aktivieren: Unter thermischem Aktivieren versteht man das Aktivieren eines über thermische Zusammenhänge definierten Vorgangs.

Die drei folgenden Grundoperationen lassen sich auf molekulare und chemische Wirkprinzipien zurückführen. Sie werden aufgrund ihrer Wirkungsweise als die sogenannten **chemischen Grundoperationen** bezeichnet:

GOP 10 Chemisches Aktivieren: Unter chemischem Aktivieren versteht man das Aktivieren einer chemischen Reaktion [163]. Dies geschieht durch Zusammenführung bzw. Zuführungen von chemischen Elementen oder Stoffen.

GOP 11 Ionisieren: Ionisieren ist die Abtrennung von Elektronen eines neutralen Atoms oder Moleküls, so dass ein positives Ion zurückbleibt [74].

GOP 12 Verbrennen: Unter Verbrennen versteht man eine chemische Reaktion mit Sauerstoff unter Entstehung von Oxiden der Eingangsstoffe, Licht und Wärme [151]. Der Ablauf der Reaktion entspricht einem chemischen Vorgang. Die Aktivierung der Reaktion Verbrennen erfolgt nicht zwangsläufig chemisch, sie kann durch die Zuführung aller Formen der Arbeit in Gang gesetzt werden.

Auf Basis dieser zwölf beschriebenen Grundoperationen lassen sich nicht alle Fertigungsverfahren der DIN 8580 energetisch beschreiben. Dies ist dem Aufbau der DIN 8580 geschuldet. Sie beinhaltet auch sehr spezifische Fertigungsverfahren, die sich nur indirekt auf Basis der mechanischen Belastungsformen, bzw. nicht durch thermodynamische und nicht durch chemische Vorgänge beschreiben lassen. Dementsprechend ist es erforderlich, weitere spezifische Grundoperationen zur energetischen Beschreibung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 einzubeziehen.

Die verbleibenden Grundoperationen zur energetischen Beschreibung der Fertigungsverfahren der DIN 8580 lassen sich nicht den drei obigen Gruppen zuordnen. Sie stehen hinsichtlich ihres Wirkprinzips in keinem Zusammenhang. Daher werden sie in der vierten Gruppe, der Gruppe der **Sonderformen**, zusammengefasst:

GOP 13 Magnetisieren: Unter Magnetisieren versteht man, einem ferromagnetischen Stoff gezielte magnetische Eigenschaften zuzuweisen [36].

GOP 14 Pose ändern: Pose ändern bedeutet die Veränderung der Position und Orientierung in Folge einer spezifischen Bewegung eines Objekts.

GOP 15 Vorspannen: Unter Vorspannen versteht man das künstliche Unter-Spannung-Setzen von Teilen bevor die tatsächlichen Beanspruchungsbedingungen anliegen [110].

Tabelle 10: Energetischer Zusammenhang der Grundoperationen

Grundoperation	Energetischer Zusammenhang
GOP 1 Drücken [23]	$GOP_1 := W = \sigma_d \cdot A \cdot s$ Gleichung 21
GOP 2 Ziehen [23]	$GOP_2 := W = \sigma_x \cdot A \cdot s$ Gleichung 22
GOP 3 Scheren [23]	$GOP_3 := W = \tau_{sm} \cdot A \cdot s$ Gleichung 23
GOP 4 Biegen [23]	$GOP_4 := W = \frac{\sigma_b \cdot \frac{I_{yy}}{z}}{l_H} \cdot s$ Gleichung 24
GOP 5 Tordieren [23]	$GOP_5 := W = \frac{\tau_t \cdot \frac{I_{yy}}{z}}{l_H} \cdot s$ Gleichung 25
GOP 6 Schmelzen [205]	$GOP_6 := Q = q \cdot m$ Gleichung 26
GOP 7 Verdampfen [205]	$GOP_7 := Q = q \cdot m$ Gleichung 27
GOP 8 Sublimieren [205]	$GOP_8 := Q = q \cdot m$ Gleichung 28
GOP 9 Thermisches Aktivieren [97]	$GOP_9 := Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ Gleichung 29
GOP 10 Chemisches Aktivieren [163]	$GOP_{10} := E_A = R \cdot \ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1}$ Gleichung 30
GOP 11 Ionisieren [74]	$GOP_{11} := W = U \cdot Q_{EL}$ Gleichung 31
GOP 12 Verbrennen [151]	$GOP_{12} := Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ Gleichung 32
GOP 13 Magnetisieren [36]	$GOP_{13} := A = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot H^2 \cdot V$ Gleichung 33
GOP 14 Pose ändern [97]	$GOP_{14} := W = F \cdot s$ Gleichung 34
GOP 15 Vorspannen [110]	$GOP_{15} := W = \frac{1}{2} D \cdot s^2$ Gleichung 35

6.2 Bestimmung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs für Fertigungsverfahren der DIN 8580

Im Folgenden wird der erforderliche Energiebedarf zur Umsetzung einer Transformation mittels einer oder einer Kombination aus Grundoperationen erläutert. Der Mindestenergiebedarf für die geplante Transformation wird auf Basis physikalischer und chemischer Grundlagen und Gesetze in Folge der Materialänderung zwischen Eingangs- und Endzustand durch Ausführung einer Grundoperation bestimmt. Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf ist bestimmt durch einen absoluten Wert in Höhe der erforderlichen Energiemenge.

Der **grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf** E_{GM} entspricht der Mindestenergiemenge, um aus makroskopischer Sicht eine Grundoperation durchzuführen. Die Mindestenergiemenge für eine Grundoperation lässt sich als spezifische Funktion, entsprechend Tabelle 10, für die zu verrichtende Arbeit zur Umsetzung dieser Grundoperation beschreiben. Die Berechnung erfolgt auf Basis der wertmäßigen Änderung der charakteristischen Materialkennwerte und Zustandsdifferenzen zwischen Eingangs- und Endzustand. Die Änderung eines Objekts oder Materials während einer Transformation ist eindeutig definiert durch die Größen Pose, Geometrie, Werkstoffeigenschaften und dem thermodynamischen Zustand [129].

$$E_{GM} = f(GOP_i); i \in \{1; \dots; 15\}$$

Gleichung 36

Der E_{GM} beschreibt also den mindestens erforderlichen Energiebedarf für die Ausführung einer Grundoperation im Rahmen der Umsetzung einer Transformation.

Erfordert die Ausführung einer Transformation mehrere Grundoperationen, so lässt sich der Mindestenergiebedarf für die Transformation aus der Summe der zugehörigen grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfe darstellen. Das zu transformierende Material lässt sich durch seinen Eingangs- und Endzustand unterscheiden. Als Eingangsmaterial wird das Objekt oder der Stoff bezeichnet, welches dem Produktionsschritt zugeführt wird, um in einen anderen Zustand transformiert zu werden. Der Material-Endzustand ist charakterisiert durch die Auswirkungen des Transformationsvorgangs. Die Berechnung des Mindestenergiebedarfs erfolgt auf Basis der für die Transformation verantwortlichen Grundoperationen und bestehender Fertigungszeichnungen. Durch die Fertigungszeichnung ist die erforderliche Wandlung des Materials eindeutig definiert. Der Mindestenergiebedarf lässt sich somit funktional durch die energetischen Zusammenhänge der Grundoperationen und der wertmäßigen Differenz der Zustandsgrößen berechnen, welche im Folgenden spezifiziert werden:

Die **Pose** eines Objekts ist eindeutig definiert durch dessen Position und Orientierung. Die Differenz zwischen Eingangs- und Endposition sowie der Orientierungsänderung stellt den erforderlichen Transformationsbedarf dar. Für die Durchführung einer Trans-

formation muss dem betrachteten System Arbeit zugeführt werden. Auf Basis der Gesetzmäßigkeiten für die erforderliche mechanische Arbeit im Rahmen einer Grundoperation lässt sich die für die Transformation notwendige Mindestenergie in Abhängigkeit der Objektmasse, der Richtung und des kürzesten Weges für eine Translation oder Rotation bestimmen. Der kürzeste Weg entspricht der Strecke, die allein zur Realisierung der Transformation erforderlich ist. Insbesondere bei Fügeverfahren ist dies der Weg der Relativbewegung zweier Objekte zueinander für den tatsächlichen Fügevorgang. Umfasst die geplante Transformation eine Relativbewegung der zu transformierenden Objekte, so gilt der Nullpunkt (Schwerpunkt) des sich bei der Transformation in Ruhe befindenden Objekts als Basis. Dieser Nullpunkt wird folgend als Transformationsnullpunkt bezeichnet. Als Ausgangsposition des bei der Transformation zu bewegendes Objekts ist dessen Schwerpunkt im definierten Transformationsnullpunkt zu sehen. Dadurch wird eine unter realen Bedingungen minimale Strecke der erforderlichen Bewegung angenommen, um hieraus eine minimal erforderliche Arbeit zur Durchführung der Transformation zu bestimmen. Erfahren zur Transformation mehrere Objekte eine relative Bewegung zueinander, so wird eines als Referenzobjekt definiert, dessen Nullpunkt wiederum als Ausgangsposition der Schwerpunkte aller anderen Objekte dient. Die mindestens erforderliche Arbeit zur Änderung der Pose eines Körpers entspricht dem Mindestenergiebedarf.

Die **Geometrie** eines Objekts wird durch dessen Form [56] und Oberfläche [52] eindeutig definiert. Die Form beschreibt die geometrischen Dimensionen eines Objekts, die Oberfläche hingegen die Beschaffenheit der Dimensionen. Die Differenz zwischen Eingangs- und Endform sowie der Oberflächenänderung stellt den erforderlichen Transformationsbedarf dar. Durch die geometrischen Produktspezifikationen (GPS) nach DIN EN ISO 1302 werden die geometrische Beschaffenheit eines Bauteils sowie die zu bearbeitenden Oberflächen bestimmt. Auf Basis der Gesetzmäßigkeiten für die erforderliche Arbeit zur Umsetzung einer Grundoperation lässt sich die notwendige Mindestenergie bestimmen. Dies geschieht in Abhängigkeit der zu bearbeitenden Oberfläche, der Formänderung und des hierfür kürzesten Weges. Der kürzeste Weg beschreibt die Strecke zur Erreichung der Nennmaße der idealen Gestalt [240] nach DIN ISO 8015 und DIN EN ISO 1302. Auf Basis der in der Fertigungszeichnung eines Bauteils definierten Oberflächenangaben lässt sich die für deren Erzeugung erforderliche Grundoperation ableiten.

Werkstoffeigenschaften werden dargestellt durch spezifische Werkstoffkennwerte. Ein Werkstoff besitzt im stabilen Eingangs- und Endzustand eine definierte Stoffeigenschaft, die durch einen spezifischen Werkstoffkennwert charakterisiert wird. Stoffeigenschaften beruhen auf den Gefügestrukturen des Materials. Sie werden durch das wechselseitige Eindringen und Austreten von Atomen des zu transformierenden Werkstoffs, von Fremdatomen aus der Umgebung oder durch Bildung sog. Diffusionschichten an der Oberfläche bestimmt [114]. Werden im Zuge einer Transformation

Werkstoffeigenschaften verändert, so ist hierfür eine Mindestenergie erforderlich, welche die Überführung eines Materials zwischen dem energetisch stabilen Eingangs- und energetisch stabilen Endzustand auf atomarer Ebene herbeiführt.

Der **thermodynamische Zustand**, in dem ein Material vorliegt, ist abhängig von den Umgebungsbedingungen. Er wird beeinflusst durch Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit der Umgebung und energetisch beschrieben durch die innere Energie eines Objekts [152]. Um die Umgebung bzgl. der zu verrichtenden Arbeit an einem Objekt für eine Zustandsänderung eindeutig zu definieren, erfordert es eine Festlegung von deren Zustand und Raum. Im Umfeld der Produktion werden objektunabhängige Umgebungskenngrößen als Referenz für den Eingangszustand durch den Normzustand nach DIN 1343 [44] bei trockener Luft [15] definiert. Zur Überführung eines Objekts von dessen so definiertem Eingangszustand ist ein Mindestenergiebedarf zur Durchführung einer Transformation zum Erreichen des definierten Endzustandes ermittelbar. Die Transformation geschieht in Abhängigkeit einer Grundoperation durch Zuführung von Arbeit zur Veränderung der inneren Energie des Objekts.

Unter Berücksichtigung dieser Zustandsgrößen und der Modellvorstellungen zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs sowie der erforderlichen Form der Arbeit lässt sich für ein Fertigungsverfahren die zugehörige Grundoperation bestimmen. Das prinzipielle Vorgehen zur Bestimmung einer Grundoperation für ein Fertigungsverfahren ist schematisch in Abbildung 33 gezeigt. Hierzu müssen zunächst die zu verändernden Zustandsgrößen gemäß der durchzuführenden Transformation ermittelt werden. Anschließend wird die Transformation, zur ihrer energetischen Beschreibung, einem der vier Modelle zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs zugeordnet. Anhand dieser Zuordnung kann die erforderliche Form der Arbeit sowie deren Wirkprinzip festgelegt werden. Zum Wirkprinzip zählen neben der Form der Arbeit, deren Wirkrichtung und das Änderungsverhalten der Zustandsgrößen. Dieses Änderungsverhalten kann linear oder nicht linear erfolgen. Das Änderungsverhalten ist in der Auswahl der Grundoperation zu berücksichtigen. Stehen die Form der Arbeit und deren Wirkprinzip¹⁷ fest, so lässt sich daraus die entsprechende Grundoperation ableiten.

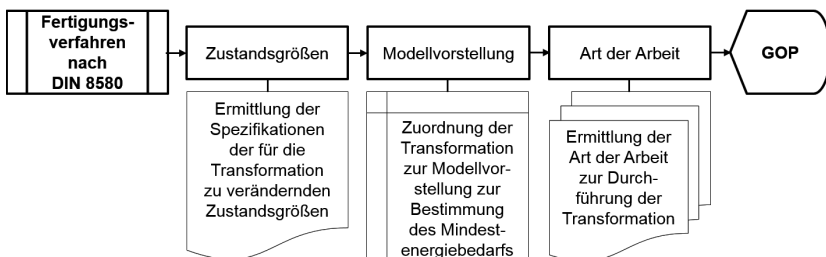


Abbildung 33: Schematisches Vorgehen zur Bestimmung einer Grundoperation

¹⁷ Das Wirkprinzip beschreibt das gesetzmäßige Zusammenwirken der einzelnen Wirkfaktoren [247].

6.3 Grundoperationen zur Ermittlung der Mindestenergiebedarfe für die Fertigungsverfahren der DIN 8580

Die DIN 8580 unterteilt die Fertigungsverfahren, unter denen alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern verstanden werden, in sechs Hauptgruppen, die sich wiederum in Gruppen, Untergruppen und deren Unterteilungen gliedern lassen [46]. Die Eingliederung eines Produktionsprozesses in eine Hauptgruppe ermöglicht eine qualitative Beschreibung der Energiebedarfe. Da innerhalb einer Hauptgruppe eine große Anzahl verschiedener, inhomogener Verfahren existieren, die sich bzgl. der erforderlichen Arbeit zur Verrichtung unterscheiden, ist eine einheitliche quantitative Ermittlung des Arbeits- und Energieaufwands nicht für die Hauptgruppen direkt möglich. Dies ist der Struktur der DIN 8580 geschuldet, die nicht unter dem Aspekt der erforderlichen Energie zur Umsetzung eines Fertigungsverfahrens definiert ist. Die Unterteilung der Hauptgruppen basiert auf der Tatsache, dass diese entweder die Schaffung einer Ausgangsform aus formlosem Stoff, die Veränderung der Form oder die Veränderung der Stoffeigenschaften zum Ziel haben. Bei der Veränderung der Form wird der Zusammenhalt entweder beibehalten, vermindert oder vermehrt, wie der Überblick der Fertigungsverfahren in Abbildung 34 zeigt [245] [46]:

Fertigungsverfahren nach DIN 8580					
Die Form der Werkstücke wird durch das Verfahren					
geschaffen	geändert			beibehalten	
Haupt- gruppe 1	Haupt- gruppe 2	Haupt- gruppe 3	Haupt- gruppe 4	Haupt- gruppe 5	Haupt- gruppe 6
Urformen	Umformen	Trennen	Fügen	Beschichten	Stoffeigen- schaften ändern
geschaffen	beibehalten	verkleinert	vergrößert		beibehalten
Der Zusammenhalt des Werkstoffes wird durch das Verfahren					

Abbildung 34: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [46]

Auf Untergruppenebene und ihren Unterteilungen ist aus energetischer Sicht die Rückführung eines Fertigungsverfahrens auf die dazu erforderlichen Grundoperationen möglich. Die verfahrensspezifische Abbildung der Grundoperation ermöglicht die quantitative Ermittlung des Energiebedarfs unter Berücksichtigung der Verfahrensspezifikationen. Entsprechend der Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [46] lassen sich Produktionsprozessen folglich Grundoperationen zu deren Durchführung zuordnen. Auf deren Basis erfolgt die Ermittlung des Mindestenergiebedarfs nach allgemeingültigen energetischen Beziehungen.

6.3.1 Urformen

Der spezifische Energiebedarf für eine dem Urformen [46] zugehörige Grundoperation lässt sich ermitteln durch thermodynamische Zusammenhänge für das Schmelzen, Sublimieren, Verdampfen und der thermischen Aktivierung. Darüber hinaus lassen sich Verfahren dieser Gruppe durch mechanisch zugeführte Arbeit, in Form von Zug oder Druck, in Gang setzen. Auf Basis der Zustandsdifferenzen zwischen Edukt und Produkt von Pose (**P**), Geometrie (**G**), Werkstoffeigenschaften (**W**) und dem thermodynamischen Zustand (**TZ**) lässt sich unter Berücksichtigung der spezifischen Werkstoffkenngrößen der Mindestenergiebedarf berechnen. Dieser wird aufgebracht durch thermische (**T**), mechanische (**M**), elektrische (**E**) oder strahlungstechnische (**S**) Arbeit, wie in Abbildung 35 dargestellt. Der Füllgrad der dargestellten Kreissymbole visualisiert die Relevanz der Zustandsgrößen und Arbeitsformen für die jeweilige Gruppe. Je ausgeprägter die Füllung der Kreissymbole der Zustandsgrößen, desto charakteristischer ist diese Zustandsgrößendifferenz zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs. Je höher der Füllgrad der Kreissymbole für die Formen der Arbeit, umso bedeutsamer ist die jeweilige Arbeitsform zur Erbringung des Mindestenergiebedarfs. Dies gilt jeweils aggregiert für die zugehörigen Verfahren der aufgeführten Untergruppen¹⁸.

Urformen (Hauptgruppe 1 DIN 8580)												
Definition: Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhaltes; hierbei treten die Stoffeigenschaften des Werkstückes bestimmbar in Erscheinung.												
Eingesetzte Grundoperationen beim Urformen												
Schmelzen, Sublimieren, thermisches Aktivieren, Verdampfen, Drücken, Ziehen												
Gruppe	Der Eingangszustand ist definiert durch:				Form der Arbeit zur Durchführung der Grundoperation:				Der Endzustand ist definiert durch:			
	P	G	W	TZ	T	M	E	S	P	G	W	TZ
1.1 Urformen aus dem flüssigen Zustand												
1.2 Urformen aus dem plastischen Zustand												
1.3 Urformen aus dem breiigen Zustand												
1.4 Urformen aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand												
1.8 Urformen aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand												
1.9 Urformen aus dem ionisierten Zustand												

Abbildung 35: Grundoperationen zur Energiebedarfsermittlung für das Urformen

¹⁸ Die Nomenklatur der Zustandsgrößen (**P**, **G**, **W**, **TZ**) und Arbeitsformen (**T**, **M**, **E**, **S**) gilt für alle weiteren Darstellungen dieses Kapitels. Ebenso die Füllgraddarstellung der Kreissymbole als Maß der Relevanz der einzelnen Größe zur Bestimmung des grundoperationenspezifischen Mindestenergiebedarfs aggregiert für die Verfahren der jeweiligen Untergruppe.

Für das Urformen aus dem flüssigen Zustand muss als Grundoperation zunächst der flüssige Zustand hergestellt werden. Daher gilt für die Gruppe 1.1 das Schmelzen als essentielle Grundoperation. Die Gruppe 1.2, Urformen aus dem plastischen Zustand, ist aus energetischer Sicht nicht so homogen eingeteilt, wie die Gruppe 1.1. Als Grundoperationen können hier das Schmelzen sowie verschiedene mechanische Belastungen erforderlich sein.

Die Untergruppe 1.2.8 Modellieren beschreibt übliche Fertigungsverfahren aus dem Handwerk. Das Modellieren ist kein automatisiertes und gebräuchliches Verfahren für die industrielle Stückgutproduktion. Insofern wird die Bestimmung des Mindestenergiebedarfs für das Modellieren an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Die Untergruppe 1.3.1 Gießen von Beton und Gips fließt ebenfalls nicht in die Betrachtung mit ein. Es gilt die gleiche Argumentation wie für das Modellieren. Zudem werden bei beiden Untergruppen Werkstoffe der Bauindustrie eingesetzt, die sich nicht auf die in Kapitel 4 beschriebenen Modellvorstellungen zur Ermittlung des Mindestenergiebedarfs zurückführen lassen.

Die Verfahren der Gruppe 1.4, Urformen aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand, werden durch die Grundoperationen Drücken oder Schmelzen beschrieben. Je nachdem, ob das Fertigungsverfahren einen Aggregatzustandswechsel bedingt.

Die Ermittlung der Grundoperationen für die Gruppe 1.5, Urformen aus dem span- oder faserförmigen Zustand, wird an dieser Stelle nicht betrachtet. Die Verfahren der Gruppe 1.5 beziehen sich auf die Erzeugung und Verarbeitung von Pappe-, Papier- und Holz- Erzeugnissen. Diese Werkstoffe lassen sich nicht auf die in Kapitel 4 beschriebenen Modellvorstellungen zur Ermittlung des Mindestenergiebedarfs zurückführen. Die Gruppennummern 1.6 und 1.7 sind durch die Norm DIN 8580 nicht besetzt, da beim Urformen Schweiß- und Lötverfahren nicht zum Tragen kommen [46].

Die beiden Gruppen 1.8 und 1.9 lassen sich je nach gewähltem Verfahren auf das Verdampfen oder das Sublimieren als Grundoperation zurückführen. Bei den Verfahren beider Gruppen wird der Mindestenergiebedarf überwiegend durch die Zufuhr elektrischer Arbeit erbracht.

Die Verfahren der Hauptgruppe Urformen lassen sich zusammenfassend maßgeblich durch die thermodynamischen und mechanischen Grundoperationen beschreiben. Die durch ein Verfahren des Urformens herbeigeführte Zustandsänderung, zwischen Edukten und Produkten, ist maßgeblich determiniert durch deren Geometrie und den thermodynamischen Zustand. Der Mindestenergiebedarf wird in der Umsetzung überwiegend durch die Zufuhr mechanischer, thermischer oder elektrischer Arbeit erbracht.

Ein Beispiel ist das Schwerkraftgießen von Metallen, dieses Fertigungsverfahren lässt sich auf die Grundoperation des Schmelzens zurückführen. Der hierfür erforderliche Mindestenergiebedarf wird in der industriellen Umsetzung üblicherweise in Form von thermischer oder elektrischer Arbeit zugeführt.

6.3.2 Umformen

Das Umformen [46] ist charakterisiert durch die plastischen Formänderungen eines Gefüges. Die hierfür erforderliche Arbeit muss für das Verändern der Gefügestruktur, wie im werkstoffwissenschaftlichen Modell des Mindestenergiebedarfs beschrieben, erbracht werden. Das Umformverhalten und die erforderliche Umformarbeit werden durch Werkstoffkenngrößen grundlegend charakterisiert. Insofern lässt sich die erforderliche Umformarbeit auf Basis der spezifischen Werkstoffkenngrößen und der geometrischen Veränderung berechnen. Die mindestens aufzubringende Umformarbeit entspricht dem Mindestenergiebedarf. Aufgrund der Richtungsabhängigkeit der verschiedenen Umformverfahren werden hier verfahrensspezifisch die Grundoperationen der mechanischen Belastung zur Berechnung angesetzt, wie Abbildung 36 zeigt:

Umformen (Hauptgruppe 2 DIN 8580)												
Definition: Fertigen durch bildsames (plastisches) Ändern der Form eines festen Körpers; dabei werden sowohl die Masse als auch der Zusammenhalt beibehalten.												
Eingesetzte Grundoperationen beim Umformen												
Drücken, Ziehen, Biegen, Scheren, Tordieren												
Gruppe	Der Eingangszustand ist definiert durch:				Form der Arbeit zur Durchführung der Grundoperation:				Der Endzustand ist definiert durch:			
	P	G	W	TZ	T	M	E	S	P	G	W	TZ
2.1 Druckumformen												
2.2 Zugdruckumformen												
2.3 Zugumformen												
2.4 Biegeumformen												
2.5 Schubumformen												

Abbildung 36: Grundoperationen zur Energiebedarfsermittlung für das Umformen

Bei der Betrachtung der Hauptgruppe des Umformens wird deutlich, dass die Einteilung auf Gruppenebene der Einteilung der mechanischen Grundoperationen folgt. Die in der DIN 8580 vorgenommene Gliederung erfolgt in Abhängigkeit der jeweiligen Belastungsrichtung, entsprechend der Gliederung der Grundoperationen. Die Hauptgruppe Umformen ist daher die aus energetischer Sicht am konsistentesten eingeteilte Hauptgruppe dieser Norm. Zur Beschreibung der energetischen Zusammenhänge werden die Grundoperationen Drücken, Ziehen, Biegen und Scheren verwendet. Die aufzubringende Arbeit ist mechanischer Art. Die aufgeführte Komponente der thermischen Arbeit gilt jeweils für Warmumformverfahren.

Ein Beispiel ist das Walzen von Metallen. Dieses Verfahren lässt sich auf die Grundoperation des Drückens zurückführen.

6.3.3 Trennen

Die für einen Trennvorgang [46] mindestens erforderliche Arbeit muss für das Vermindern oder Lösen des Gefügezusammenhalts und der damit verbundenen Formänderung aufgewendet werden. Aufgrund der Vielfältigkeit der Hauptgruppe des Trennens lässt sich einem Trennverfahren erst auf Verfahrensebene eine Grundoperation zuweisen. Die Berechnung des Mindestenergiebedarfs erfolgt auf Basis der in Abbildung 37 gezeigten Grundoperationen sowie in Abhängigkeit der für die Zustandsänderung spezifischen Werkstoffkennwerte und der Form der zugeführten Arbeit.

Trennen (Hauptgruppe 3 DIN 8580)												
Definition: Fertigen durch Aufheben des Zusammenhaltens von Körpern zur Änderung seiner Form, wobei der Zusammenhalt teilweise oder im Ganzen vermindert wird.												
Eingesetzte Grundoperationen beim Trennen												
Drücken, Ziehen, Scheren, Tordieren, Biegen, Schmelzen, Sublimieren, Verdampfen, Verbrennen, chemisches Aktivieren												
Gruppe	Der Eingangszustand ist definiert durch:				Form der Arbeit zur Durchführung der Grundoperation:				Der Endzustand ist definiert durch:			
	P	G	W	TZ	T	M	E	S	P	G	W	TZ
3.1 Zerteilen												
3.2 Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide												
3.3 Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide												
3.4 Abtragen												
3.5 Zerlegen												
3.6 Reinigen												

Abbildung 37: Grundoperationen zur Energiebedarfsermittlung für das Trennen

Die Gruppen 3.2 und 3.3 sind aus energetischer Sicht konsistent eingeteilt. Sowohl für die Verfahren der Gruppe Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide, als auch für die Verfahren der Gruppe Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide liegt die Grundoperation des Scherens zu Grunde. Die Verfahren der Gruppe 3.1 Zerteilen, 3.4 Abtragen, 3.5 Zerlegen und 3.6 Reinigen können durch alle in der Abbildung genannten Grundoperationen beschrieben werden. Zur eindeutigen Festlegung der erforderlichen Grundoperation ist die Betrachtung eines konkreten Verfahrens erforderlich. Die Verfahren der Hauptgruppe Trennen lassen sich zusammenfassend maßgeblich durch die thermodynamischen und mechanischen Grundoperationen beschreiben. Die durch ein Verfahren des Trennens herbeigeführte Zustandsänderung zwischen Edukten und Produkten ist maßgeblich determiniert durch deren Geometrie und Pose.

6.3.4 Fügen

Füge- und Montagetechnologien sind nach DIN 8580 der vierten Hauptgruppe zugeordnet [46]. Unter Fügen wird nach DIN 8593 das dauerhafte Verbinden mehrerer Bauteile geometrisch bestimmter Form oder das Zusammenbringen von Werkstücken mit formlosem Stoff verstanden. Der Zusammenhalt zwischen den Elementen wird stets lokal erzeugt und ganzheitlich vermehrt [47]. Die Unterteilung in Gruppen erfolgt nach dem Gesichtspunkt „Art des Zusammenhaltens unter Berücksichtigung der Art der Erzeugung“ [47]. Eine weitere Möglichkeit zur Strukturierung der Fügetechnologien bietet die Unterscheidung nach dem physikalischen Zusammenhalt der Fügepartner. Die Bauteile können dabei mittels Kraft-, Form- oder Stoffschluss miteinander verbunden werden [73] [159]. Allein die Definition vermittelt die Vielfalt dieser Hauptgruppe. In Folge dessen lässt sich einem Fügeverfahren erst auf Untergruppenebene eine Grundoperation zur Umsetzung zuweisen. Die Ermittlung des Mindestenergiebedarfs erfolgt durch die in Abbildung 38 gezeigten Grundoperationen.

Fügen (Hauptgruppe 4 DIN 8580)												
Definition: Auf Dauer angelegtes Verbinden oder sonstiges Zusammenbringen von zwei oder mehreren Werkstücken geometrisch bestimmter fester Form oder von eben solchen Werkstücken mit formlosem Stoff; dabei wird der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt.												
Eingesetzte Grundoperationen beim Fügen												
Pose ändern, Vorspannen, Drücken, Tordieren, Biegen, Ziehen, Schmelzen, Sublimieren, Ionisieren, chemisches Aktivieren												
Gruppe	Der Eingangszustand ist definiert durch:				Form der Arbeit zur Durchführung der Grundoperation:				Der Endzustand ist definiert durch:			
	P	G	W	TZ	T	M	E	S	P	G	W	TZ
4.1 Zusammensetzen	●	◐	◑	◒	○	●	○	○	●	◐	◑	◒
4.2 Füllen	●	◐	◑	◒	◐	●	○	○	●	◐	◑	◒
4.3 Anpressen / Einpressen	●	◐	◑	◒	○	●	○	○	●	◐	◑	◒
4.4 Fügen durch Urformen	◐	●	◑	◒	●	◐	◑	◒	◐	●	◑	◒
4.5 Fügen durch Umformen	●	●	◑	◒	◐	●	◑	○	●	●	◑	◒
4.6 Fügen durch Schweißen	◐	●	◑	◒	●	●	◑	◒	◐	●	◑	◒
4.7 Fügen durch Löten	◐	●	◑	◒	●	○	◑	◒	◐	●	◑	◒
4.8 Kleben	◐	●	◑	◒	●	◑	◑	◑	◐	●	◑	◒

Abbildung 38: Grundoperationen zur Energiebedarfsermittlung für das Fügen

Die Grundoperationen für das Fügen sind maßgeblich charakterisiert durch die Herbeiführung einer geometrischen Änderung eines Produkts, dessen Pose sowie dessen

thermodynamischen Zustands. Unter Berücksichtigung der spezifischen Werkstoffkenngrößen geschieht dies durch die Zufuhr von mechanischer, thermischer, elektrischer als auch strahlungstechnischer Arbeit. Die Berechnung des grundoperations-spezifischen Mindestenergiebedarfs erfolgt in Abhängigkeit der Form der zugeführten Arbeit. Die zugeführte Form der Arbeit ist abhängig von der Belastungsrichtung und dem –weg, bzw. der räumlichen Positionierung der Fügepartner zueinander.

Den Verfahren der Gruppe 4.1 Zusammensetzen liegen die Grundoperationen Pose ändern und Vorspannen zugrunde. Die erforderliche Arbeit zur Umsetzung wird stets in mechanischer Form erbracht. Die relevanten Grundoperationen für Gruppe 4.2 Füllen sind das Schmelzen und die Pose ändern. Der Mindestenergiebedarf wird in der Anwendung üblicherweise in Form thermischer oder mechanischer Arbeit zugeführt.

Der Umsetzung eines Verfahrens der Gruppe 4.3 Anpressen / Einpressen liegt immer eine elastische Zustandsänderung zugrunde. Daher wird in jedem Fall die Grundoperation des Vorspannens zur energetischen Beschreibung dieser Verfahren mit einbezogen. Die Grundoperationen Pose ändern, Biegen und Tordieren sind ebenso zu berücksichtigen. Die zur Umsetzung notwendige Arbeit wird stets in mechanischer Form zugeführt.

Die Gruppe 4.4 Fügen durch Urformen verhält sich energetisch entsprechend den Verfahren der Hauptgruppe 1 Urformen. Die maßgeblichen Grundoperationen sind hier ebenso das Schmelzen und das Drücken. Für die dem Fügen durch Urformen zugeordnete Untergruppe 4.4.4 Eingalvanisieren kommt die Grundoperation Ionisieren zum tragen. Für die Verfahren der Gruppe 4.5 Fügen durch Umformen gelten die gleichen Zusammenhänge zur Bestimmung der Grundoperation wie für die Hauptgruppe 2 Umformen zuvor beschrieben. Die beiden Gruppen 4.6 Fügen durch Schweißen und 4.7 Fügen durch Löten lassen sich aus energetischer Sicht gleichermaßen darstellen. Für alle ihre Untergruppen ist die Grundoperation des Schmelzens die Basis.

Den Verfahren der Gruppe 4.8 Kleben liegt als Grundoperation das chemische Aktivieren zugrunde. Eine chemische Aktivierung kann durch die Zufuhr thermischer, mechanischer, elektrischer und strahlungstechnischer Arbeit in Gang gesetzt werden. Die Gruppe 4.9 Textiles Fügen wird nicht betrachtet. Textile Werkstoffe lassen sich nicht den beschriebenen Modellvorstellungen zur Ermittlung des Mindestenergiebedarfs zuordnen.

Beispielhafte Anwendungen für das Fügen sind das Schrauben oder Klemmen. Diese Verfahren lassen sich auf die Grundoperationen Pose ändern und Vorspannen zurückführen. Der hierfür erforderliche Mindestenergiebedarf wird in der industriellen Umsetzung üblicherweise durch die Zufuhr von mechanischer Arbeit erbracht. Ein weiteres Beispiel sind das Schweißen oder das Löten. Diese Verfahren lassen sich auf die Grundoperation des Schmelzens zurückführen. Üblicherweise wird zu deren Ausführung thermische, mechanische oder elektrische Arbeit eingesetzt.

6.3.5 Beschichten

Das Beschichten [46] ist definiert durch das Aufbringen einer festhaftenden Schicht auf eine Oberfläche. Der Energiebedarf für eine, dem Beschichten [46] zugeordnete, Grundoperation lässt sich ermitteln durch thermodynamische Zusammenhänge für das Schmelzen, Sublimieren, Verdampfen und die thermische Aktivierung. Darüber hinaus lassen sich Verfahren dieser Gruppe durch mechanisch zugeführte Arbeit, in Form der Veränderung der Pose eines Stoffes, chemisches Aktivieren oder Ionisieren in Gang setzen. Auf Basis der Zustandsdifferenzen zwischen Edukt und Produkt von Pose, Geometrie, Werkstoffeigenschaften und dem thermodynamischen Zustand lässt sich, unter Berücksichtigung der spezifischen Werkstoffkenngrößen, der Mindestenergiebedarf berechnen. Dieser wird für Beschichtungsverfahren der DIN 8580 aufgebracht durch thermische, mechanische, elektrische oder strahlungstechnische Arbeit, wie Abbildung 39 zeigt.

Beschichten (Hauptgruppe 5 DIN 8580)												
Definition: Fertigen durch Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosem Stoff auf ein Werkstück; maßgebend ist der unmittelbar vor dem Beschichten herrschende Zustand des Beschichtungsstoffes.												
Eingesetzte Grundoperationen beim Beschichten												
Schmelzen, Pose ändern, chemisches Aktivieren, thermisches Aktivieren, Ionisieren, Verdampfen, Sublimieren												
Gruppe	Der Eingangszustand ist definiert durch:				Form der Arbeit zur Durchführung der Grundoperation:				Der Endzustand ist definiert durch:			
	P	G	W	TZ	T	M	E	S	P	G	W	TZ
5.1 Beschichten aus flüssigem Zustand												
5.4 Beschichten aus körnigem oder pulverförmigem Zustand												
5.6 Beschichten durch Schweißen												
5.7 Beschichten durch Löten												
5.8 Beschichten aus gas- oder dampfförmigem Zustand												
5.9 Beschichten aus ionisiertem Zustand												

Abbildung 39: Grundoperationen zur Energiebedarfsermittlung für das Beschichten

Die Gruppen 5.2 Beschichten aus plastischem Zustand und 5.3 Beschichten aus breiigem Zustand sind in der obigen Abbildung nicht aufgeführt. Die Verfahren der jeweiligen Untergruppen sind in der Norm nicht näher spezifiziert. Somit lässt sich ohne die Betrachtung eines spezifischen Vorgangs zu deren Durchführung nicht allgemein auf eine Grundoperation schließen. Eine beispielhafte Anwendung aus der Hauptgruppe Beschichten ist das Beschichten durch thermisches Spritzen. Dieses Verfahren lässt sich auf die Grundoperationen Pose ändern und Schmelzen zurückführen.

6.3.6 Stoffeigenschaften ändern

Eine Änderung der Stoffeigenschaften [46] im Zuge von Verfahren der DIN 8580, wird durch thermische, mechanische, elektrische oder strahlungstechnische Arbeit hervorgerufen. Der Mindestenergiebedarf hierfür lässt sich verfahrensspezifisch durch die Grundoperationen des thermischen und chemischen Aktivierens, des Magnetisierens oder der mechanischen Zug- oder Druckbeaufschlagung ermitteln. Die Berechnung erfolgt in Abhängigkeit des Verfahrens und der zugehörigen Werkstoffkenngrößen zur Veränderung der Werkstoffeigenschaften, wie in Abbildung 40 dargestellt.

Stoffeigenschaften ändern (Hauptgruppe 6 DIN 8580)												
Definition: Fertigen durch Verändern der Eigenschaften des Werkstoffes, aus dem ein Werkstück besteht; unvermeidbar auftretende Formänderungen gehören nicht zum Wesen dieser Verfahren.												
Eingesetzte Grundoperationen zum Ändern von Stoffeigenschaften												
thermisches Aktivieren, chemisches Aktivieren, Magnetisieren, Drücken, Ziehen												
Gruppe	Der Eingangszustand ist definiert durch:				Form der Arbeit zur Durchführung der Grundoperation:				Der Endzustand ist definiert durch:			
	P	G	W	TZ	T	M	E	S	P	G	W	TZ
6.1 Verfestigen durch Umformen												
6.2 Wärmebehandeln												
6.3 Thermomechanisches Behandeln												
6.4 Sintern / Brennen												
6.5 Magnetisieren												
6.6 Bestrahlen												
6.7 Photochemisches Verfahren												

Abbildung 40: Grundoperationen zum Ändern von Stoffeigenschaften

Zusammenfassend lässt sich für die Hauptgruppe des Stoffeigenschaften Ändern festhalten, dass die Differenz zwischen Eingangs- und Endzustand maßgeblich durch die Werkstoffeigenschaften determiniert ist. Unvermeidbar auftretende Formänderungen gehören nicht zum Wesen dieser Verfahren [46]. Der erforderliche Mindestenergiebedarf kann verfahrensspezifisch durch alle Formen der Arbeit zugeführt werden. Aufgrund der Vielfältigkeit dieser Hauptgruppe lässt sich einem zugehörigen Verfahren erst auf Untergruppenebene eine Grundoperation zur Umsetzung zuweisen.

Ein Beispiel ist das Sintern oder Brennen. Diese Verfahren lassen sich auf die Grundoperationen Drücken und thermisches Aktivieren zurückführen. Klassische Verfahren, wie das Härten oder Vergüten von Metallen, bedürfen der thermischen Aktivierung.

7 Umsetzung der Mindestenergiebedarfsermittlung als Basis zur Energieeffizienzbewertung in der Produktion

Die Umsetzung der Mindestenergiebedarfsermittlung erfolgt auf Basis der Informationen aus dem Arbeitsplan in Form der vorhandenen Fertigungszeichnung eines Objekts und der festgelegten Grundoperationen in Abhängigkeit eines Fertigungsverfahrens. Sie eignet sich generell für die Energieeffizienzbewertung von Produktionsprozessen nach DIN 8580. Im Folgenden wird die Ermittlung der spezifischen Mindestenergiebedarfe, die hierzu erforderlichen Eingangsgrößen sowie der Bilanzraum und das Betrachtungsfeld beschrieben.

7.1 Systematische Ableitung der Mindestenergiebedarfsermittlung zur Energieeffizienzbewertung von Produktionsprozessen

Da sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Einflussgrößen auf den Energieverbrauch auswirkt, ist der erste Schritt die Erfassung und die Analyse aller Einflussgrößen auf den Energiebedarf eines Produktionsprozesses. Im zweiten Schritt können die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der erfassten Einflussgrößen in einem Modell abgebildet werden. Anhand des gebildeten Modells soll abschließend die Ableitung einer prozessspezifischen Berechnungssystematik zur Bestimmung der spezifischen Mindestenergiebedarfe ermöglicht werden [166].



Abbildung 41: Vorgehen zur Ableitung der Berechnungssystematik [136]

Analyse der Einflussfaktoren auf den Energiebedarf

Die Erfassung und Analyse aller Einflussgrößen auf den Energiebedarf bei der Durchführung eines Herstellungsschritts erfolgt strukturiert anhand des Ursache-Wirkungs-Diagramms. Es trägt dazu bei, dass alle denkbaren Ursachen für ein aufgetretenes Problem unter Berücksichtigung der verschiedenen Einflüsse transparent gemacht werden können. Die Einflussfaktoren lassen sich dadurch eindeutig ihrer Ursache zuordnen. Als erster Schritt bei der Problemlösung werden die Haupteinflussgrößen ermittelt. Dafür werden die so genannten 5M¹⁹ (Mensch, Material, Methode, Maschine und Milieu) verwendet [39]. Innerhalb der Haupteinflussgrößen können in einem weiteren Schritt Nebeneinflussgrößen herausgearbeitet werden [218]. Im vorliegenden

¹⁹ Die 5M-Methode, Ishikawa-Diagramm, Fischgräten-Diagramm oder auch Ursache-Wirkungsdiagramm genannt, verfolgt das Ziel, Ursachen für die Entstehung von Problemen zu erkennen. Dies erfolgt durch die systematische Beschreibung anhand der grafischen Zuordnung von Problem bzw. Wirkung (Fischkopf) und möglicher einzelner Ursachen bzw. Einflussgrößen mit Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den Ursachen (Fischgräten). [100]

Fall handelt es sich nicht um ein Problem, sondern um die variable Größe „Energiebedarf“. Dementsprechend muss die Systematik des Ursache-Wirkungsdiagramms angepasst werden. Generell wird durch die Konstruktion und die Planung, der zur Realisierung erforderlichen Produktionsschritte, der überwiegende Teil des späteren Energiebedarfs vorbestimmt. Durch die Konstruktion sind das Material und das grundlegende Fertigungsverfahren definiert. Die Planung umfasst die Auswahl und die Definition der Herstellungsmethode sowie die Bestimmung der zu verwendenden Produktionsanlage. Diese zur Produktion direkt beeinflussbaren Planungsbestandteile entsprechen den Einflussgrößen Material, Methode und Maschine, sowie dem Einfluss durch den Menschen und das Milieu. Die Berechnung des Mindestenergiebedarfs ist determiniert durch die Einflussgröße Material. Einflussfaktoren auf den Energiebedarf der Umgebung bzw. des Milieus, der Methode und der Maschine werden, sofern sie zur Wertschöpfung erforderlich sind, als Energieverbrauch erfasst. Die Einflussgröße Mensch wird bei der Berechnung des Mindestenergiebedarfs nicht berücksichtigt [129] [166]. In der folgenden Abbildung 42 wird der Zusammenhang zwischen den fünf Haupteinflussgrößen und den einzelnen Prozessschritten nochmals deutlich.

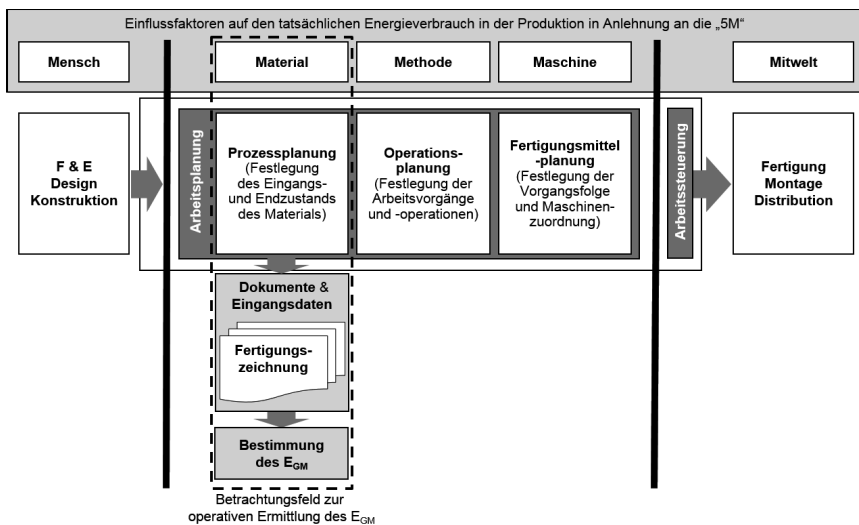


Abbildung 42: Betrachtungsfeld zur Ermittlung des E_{GM} in der Produktion

Im Zuge der Planung wird durch Entwicklung und Design, in Folge der Gewährleistungen funktionaler, kundenspezifischer und betriebswirtschaftlicher Anforderungen, der zur Herstellung eines Produkts erforderliche Mindestenergiebedarf determiniert. Dieser lässt sich bestimmen durch die Wahl des Materials und des geplanten Transformationsvorgangs sowie der Fertigungsvorgaben durch die Arbeitsvorbereitung.

Die Ermittlung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs (E_{GM}) wird für ein bereits konstruiertes und für die Produktion geplantes Produkt auf Basis prozessspezifischer Daten der Arbeitsvorbereitung durchgeführt. Vorgelagerte Prozesse von Forschung und Entwicklung sowie Design und Konstruktion haben zwar Einfluss auf den späteren Energiebedarf bei der Herstellung, werden aber für die Ermittlung des Mindestenergiebedarfs nicht betrachtet oder bewertet.

Die bestehende Produktauslegung und Konstruktion, in Folge kundenspezifischer und funktionaler Anforderungen, sei als Einstieg der Methode als gegeben angenommen. Auf Basis der festgelegten Faktoren erfolgt die Mindestenergiebedarfsberechnung. Als Grundlage der Berechnung dienen die Angaben aus einer bestehenden Fertigungszeichnung. In Folge der Festlegungen der Prozessfolge, zur Herstellung eines Produkts durch die Fertigungsmittelplanung, lässt sich der E_{GM} bestimmen. Die operative Berechnung des E_{GM} erfolgt anhand spezifischer physikalischer Gesetzmäßigkeiten der Grundoperation, in Abhängigkeit der geplanten Transformation des Materials und dessen zugehöriger Werkstoffkennwerte.

Im Folgenden wird auf die verschiedenen Abhängigkeiten der Einflussfaktoren in Bezug auf die Transformation und den Energiebedarf eingegangen.

Modelldarstellung einer Transformation in der Produktion als Basis zur Ableitung der Mindestenergiebedarfsberechnung

Da zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren Abhängigkeiten bestehen, ist es erforderlich, diese Wechselwirkungen auch in der Berechnungssystematik für den Mindestenergiebedarf zu berücksichtigen. Um dies zu ermöglichen, wird folgend ein Modell gebildet, welches die grundlegenden Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der Haupteinflussgrößen in der Produktion strukturiert aufzeigt, siehe Abbildung 43.

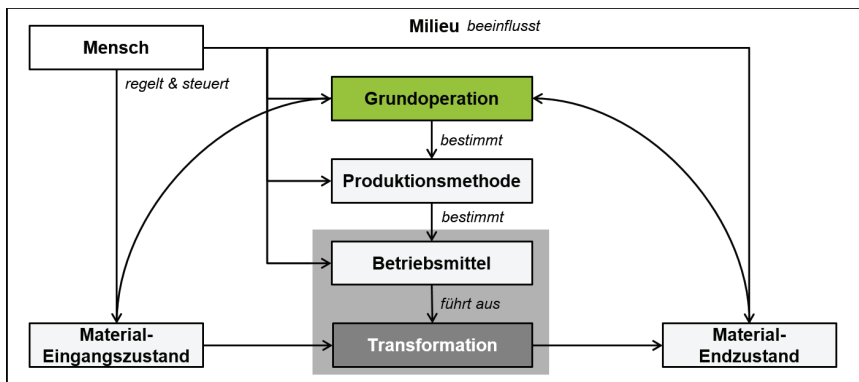


Abbildung 43: Wechselwirkung der Haupteinflussfaktoren auf den Energieverbrauch bei einem Transformationsvorgang [132]

Bei der Durchführung eines Produktionsschrittes wird Material, Energie und Information von einem definierten Eingangszustand in einen definierten Endzustand transformiert. Die Veränderung des Materials im Zuge der Transformation lässt sich beschreiben durch dessen Pose, dessen Geometrie, dessen Werkstoffeigenschaften und dessen thermodynamischen Zustands. Der Transformationsvorgang lässt sich beschreiben durch mindestens eine Grundoperation, die durch ein bestimmtes Fertigungsverfahren der DIN 8580 determiniert ist. Die Durchführung der Grundoperation erfolgt durch eine bestimmte Produktionsmethode unter Einsatz bestimmter Betriebsmittel. Die Grundoperation kann durch unterschiedliche Produktionsmethoden durchgeführt werden. Die Grundoperation des Schmelzens beim Löten kann als Beispiel durch verschiedene Lötverfahren, z.B. durch Konduktion, Konvektion sowie elektrische Induktion auf unterschiedlichen Anlagen erfolgen. Unter dem Betriebsmittel werden Energieverbraucher im Sinne von Maschinen²⁰, Anlagen oder Apparaten verstanden, mit Hilfe derer das Verfahren ausgeführt wird und somit der Transformationsprozess erfolgt [132]. Im Folgenden wird die Systematik zur Ermittlung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs entlang der Betrachtungsebenen einer Transformation aufgezeigt. Um die Bewertung von gesamten Fertigungseinrichtungen zu ermöglichen, wird die Systematik um den Faktor der Produktionsumgebung erweitert. Die Berechnung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs erfolgt in Folge der festgelegten Fertigungsparameter.

7.2 Vorgehen zur Berechnung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs in Folge der Fertigungsparameter

Die Berechnung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs erfolgt auf Basis der für einen Produktionsprozess erforderlichen Grundoperationen. Die Berechnung kann bereits in der Planungsphase eines Produkts nach definierter Fertigungszeichnung, durch die Konstruktion oder Arbeitsvorbereitung, durchgeführt werden. Auf Basis der Fertigungszeichnung und der definierten Prozessfolge lassen sich die geplanten Zustandsänderungen sowie die dafür notwendigen Grundoperationen, wie für die Verfahren der DIN 8580 vorhergehend dargestellt, ableiten.

Die Berechnung der Mindestenergiebedarfe erfolgt unter idealen Bedingungen. Für die Materialspezifikationen ist von einer idealen Qualität auszugehen [132]. Im Umfeld der Produktion werden objektunabhängige Umgebungskenngrößen als Referenz für ideale Bedingungen durch den Normzustand²¹ nach DIN 1343 [44] bei trockener Luft [15]

²⁰ Eine Maschine ist definiert als „mit einem Antriebssystem ausgestattete oder dafür vorgesehene Gesamtheit miteinander verbundener Teile oder Vorrichtungen, von denen mindestens eine(s) beweglich ist und die für eine bestimmte Anwendung zusammengefügt sind. [...] Der Begriff „Maschine“ gilt auch für Maschinenanlagen, die so angeordnet und gesteuert werden, dass sie als einheitliches Ganzes funktionieren, um das gleiche Ziel zu erreichen.“ [51]

²¹ Der Normzustand ist nach DIN 1343 derjenige Referenzzustand, der durch die Normtemperatur $T_n=273,15\text{ K}$ und den Normdruck $P_n=101325\text{ Pa}$ festgelegt ist.

definiert. Die Qualität des Materials wird beschrieben durch dessen Materialspezifikationen. Die Materialspezifikationen sind inhärente Merkmale eines Objekts, die bestimmte Anforderungen erfüllen. Diese Merkmale sind dargestellt durch einen Nennwert und den zugehörigen Toleranzbereich. Von ideal wird an dieser Stelle gesprochen, wenn das Merkmal genau den Zustand des Nennwertes vorweist [132] [55]. Die Berechnung erfolgt somit durch den Einsatz des spezifischen Nennwertes einer bestimmten Materialspezifikation.

Anhand des folgenden Flussdiagramms ist das grundsätzliche Vorgehen zur Berechnung des Mindestenergiebedarfs dargestellt.

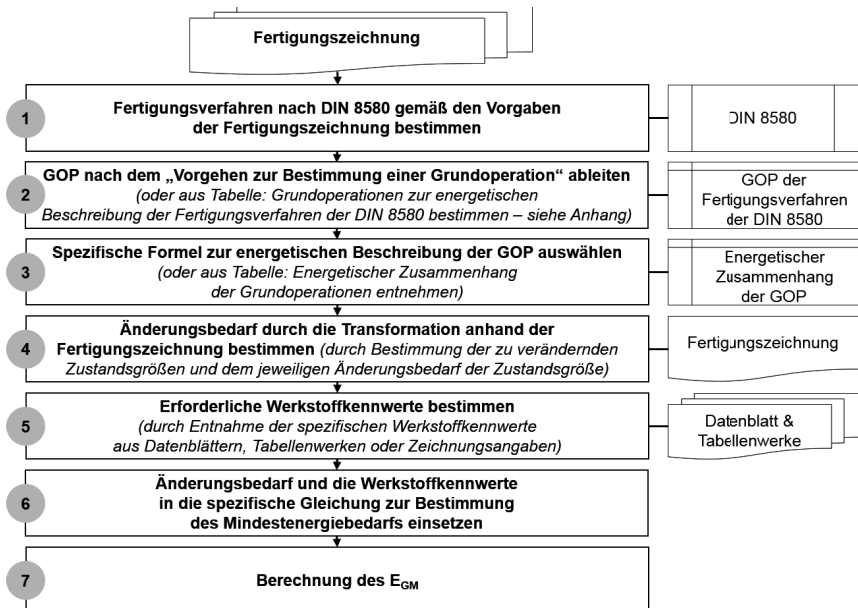


Abbildung 44: Flussdiagramm zur Berechnung des E_{GM}

Anhand einer vorliegenden Fertigungszeichnung wird ein Fertigungsverfahren gemäß DIN 8580 ausgewählt. Anschließend wird die zugehörige Grundoperation gemäß dem schematisch gezeigten Vorgehen aus Abbildung 33 abgeleitet. Für die Verfahren der DIN 8580 kann die Grundoperation alternativ der Tabelle 30 im Anhang entnommen werden.

Steht die Grundoperation fest, so kann die spezifische Funktion zur Beschreibung der notwendigen Arbeit zur Umsetzung der Grundoperation bestimmt werden. Die spezifischen Funktionen zur Ermittlung der erforderlichen Arbeit zur Umsetzung der Grundoperation können aus der Tabelle 10 entnommen werden.

Im Folgenden ist der spezifische Änderungsbedarf der Zustandsgrößen aus der Zeichnung zu bestimmen. Auf dieser Basis können die zur Zustandsbeschreibung erforderlichen Werkstoffkennwerte dem Datenblatt bzw. gängigen Tabellenwerken entnommen werden. Die betragsmäßigen Größen zur Beschreibung der Zustandsänderung sowie die einhergehenden Werkstoffkenngrößen werden in die zuvor aufgestellte Gleichung zur Berechnung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs eingesetzt.

7.3 Darstellung der Berechnung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs an einem Beispielbauteil

Das Vorgehen zur Berechnung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs, wie vorweg allgemein anhand des Flussdiagramms dargestellt, wird im Folgenden anhand eines Beispiels gezeigt. Bei dem gewählten Beispiel handelt es sich um einen Flansch aus dem Werkstoff S235JR.

Wie der Fertigungszeichnung nach Abbildung 45 zu entnehmen ist, sind zur Herstellung des Flansches drei unterschiedliche Prozessschritte notwendig. Zu Beginn muss der dargestellte Zapfen gedreht und die vier Durchgangsbohrungen in der Platte hergestellt werden. Abschließend werden der Zapfen und die Platte entsprechend den Zeichnungsangaben geschweißt.

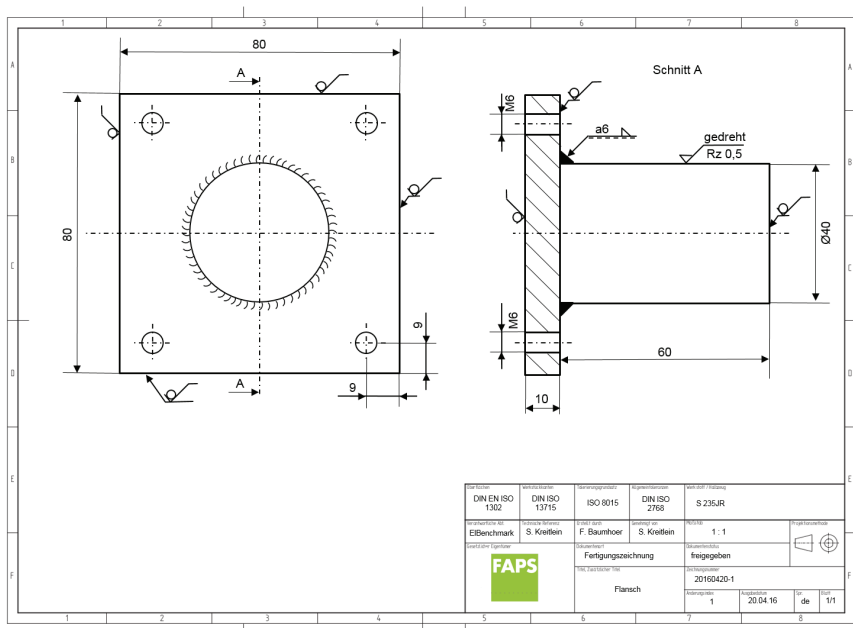


Abbildung 45: Fertigungszeichnung Flansch

Im Folgenden sind die einzelnen Schritte entsprechend dem Vorgehen des Flussdiagramms nach Abbildung 44, zur Berechnung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs für den Flansch, entsprechend der Fertigungszeichnung Abbildung 45, dargestellt.

Wie der folgenden Tabelle 11 entnommen werden kann, wird für jeden der drei Prozessschritte die Berechnung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs durchgeführt. Die Zahlen- und Werkstoffkennwerte hierzu entstammen aus der gezeigten Bauteilzeichnung für den Flansch bzw. aus dem Tabellenbuch Metall [76].

Tabelle 11: Berechnung des E_{GM} für das Beispiel Flansch

Auswahl des Fertigungsverfahrens nach DIN 8580, gemäß den Vorgaben der Fertigungszeichnung:			
1	3.2.1 Drehen	3.2.2 Bohren	4.6.2 Schmelzverbindungsschweißen
Ableiten der spezifischen Grundoperation nach dem „Vorgehen zur Bestimmung einer Grundoperation“:			
2	GOP 3: Scheren	GOP 3: Scheren	GOP 6: Schmelzen
Auswahl der Formel nach dem Zusammenhang zur energetischen Beschreibung der GOP:			
3	$W = \tau_{sm} \cdot A \cdot s$	$W = \tau_{sm} \cdot A \cdot s$	$Q = c \cdot m \cdot \Delta T + q \cdot m$
Bestimmung der zu verändernden Zustandsgrößen:			
4	Geometrie	Geometrie	Thermodynamischer Zustand
Bestimmung des Änderungsbedarfs der spezifischen Zustandsgrößen:			
	$A = 7540 \text{ mm}^2; s = 60 \text{ mm}$	$A = 188 \text{ mm}^2; s = 10 \text{ mm}$	$\Delta T = 1536 \text{ K}; V = 770 \text{ mm}^3$
Entnahme der spezifischen Werkstoffkennwerte aus Datenblatt & Tabellenwerken (aus Tabellenbuch Metall):			
5	$\tau_{sm} = 288 \text{ N/mm}^2$	$\tau_{sm} = 288 \text{ N/mm}^2$	$q = 205 \text{ J/g}; c = 0,477 \text{ J/gK}$ $\rho = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$
Einsetzen des Änderungsbedarfs und der Werkstoffkennwerte in die spezifische Gleichung der GOP:			
6	$E_{GM} = 130.291 \text{ J}$	$E_{GM} = 541 \text{ J}$	$E_{GM} = 5.454 \text{ J}$
Bestimmung der Anzahl der Grundoperationen für die Fertigung des Flansches:			
7	1	4	1
Berechnung des Mindestenergiebedarfs für die Fertigung des Flansches:			
$130.291 \text{ J} + 2.164 \text{ J} + 5.454 \text{ J} = 137.909 \text{ J}$			

Steht der Mindestenergiebedarf für die drei Prozessschritte fest, wird er mit der jeweiligen durchzuführenden Anzahl der einzelnen Prozessschritte multipliziert.

In diesem Fall wird jeweils einmal gedreht und geschweißt und viermal gebohrt. Die Summe der Mindestenergiebedarfe für die Umsetzung der einzelnen Grundoperationen ergibt den grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarf $E_{GM, \text{Flansch}}$ für das in der Fertigungszeichnung dargestellte Bauteil.

8 Die Kenngröße Relative Energieeffizienz zur Bewertung der Produktion

Ein produktionsebenen- und unternehmensübergreifender Vergleich der Energieeffizienz als Instrument zur Steigerung des Unternehmenserfolgs kann nur anhand einer Systematik erfolgen, aus der eine quantifizier- und vergleichbare Größe hervorgeht. Eine solche Größe stellt die sogenannte „Relative Energieeffizienz“ (*REE*) dar. Sie ist zugleich ein quantifizierbares Maß für die Energieeffizienz der Herstellung eines Produkts und erfüllt die in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungskriterien.

Zur Berechnung der Relativen Energieeffizienz wird die theoretisch mindestens erforderliche Energie sowie die real verbrauchte Energie zur Produktherstellung benötigt. Hierzu ist es erforderlich, den Mindestenergiebedarf für eine spezifische Betrachtungsebene der Produktion zu ermitteln sowie den tatsächlich anfallenden Energieverbrauch bei der Durchführung eines Produktionsschrittes zu erfassen. Anhand dieser beiden Größen erfolgt die Bildung der *REE* als Basis für weitere Potenzialanalysen und Vergleiche zur möglichen Steigerung der Energieeffizienz, wie Abbildung 46 schematisch zeigt.

Hierzu werden im Folgenden die Begriffe Betrachtungsebenen und Bewertungsobjekte näher spezifiziert sowie die Modalitäten der Messung definiert. Im Anschluss an die Definition der Relativen Energieeffizienz wird dessen Ermittlung und Vergleichspotenzial dargestellt.

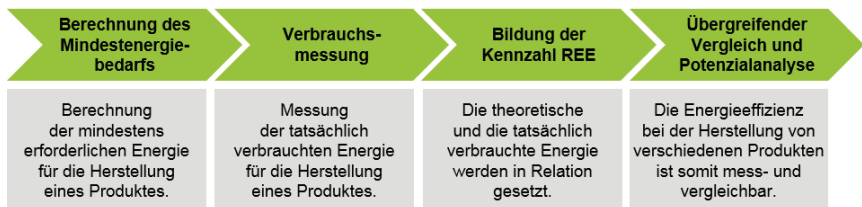


Abbildung 46: Systematik der Energieeffizienzbewertung auf Basis des Mindestenergiebedarfs [80]

8.1 Betrachtungsebenen und Bewertungsobjekte der Produktion

Prozess und Produktionseinrichtungen

Die entwickelte Methodik erlaubt die Bewertung und den Vergleich der Relativen Energieeffizienz auf Prozessebene. Zur Gewährleistung einer übergreifenden Vergleichbarkeit muss jedoch auch eine Bewertung der *REE* auf anderen Betrachtungsebenen ermöglicht werden. Diese Betrachtungsebenen lassen sich in Form einer Pyramide entsprechend Abbildung 47 darstellen.

Der eindeutigen Zuordnung jeder Betrachtungsebene der Energieeffizienzbewertung zu einer Pyramidenebene liegt folgendes Verständnis zugrunde: Jedes Element einer

Ebene lässt sich genau einem Element der jeweils nächsthöheren Ebene eindeutig zuordnen.

		Potenziale & Erkenntnisse durch die Bewertung und den Vergleich der Energieeffizienz	
Branche			Branchenübergreifende statistische Auswertung Branchenweite Zielsetzung
Unternehmen			Hinweise auf Vergleichsobjekte Kommunikation & Imagesteigerung Definition von Energieeffizienzzielen
Abteilung / Werk / Standort	Produkt	Hinweise auf Vergleichsobjekte	Hinweise auf Vergleichsobjekte Definition von Energieeffizienzzielen
Maschine / Anlage			Hinweise auf Energieeinsparpotenziale
Prozess			Hinweise auf Energieeinsparpotenziale

Abbildung 47: Betrachtungsebenen der Energieeffizienzbewertung und Potenziale

Ein Herstellungsprozess läuft immer an genau einer Anlage ab, weshalb dieser Prozess²² exakt der genannten Anlage zugeordnet werden kann. Hierbei umfasst die Betrachtungsebene „Anlage“ sowohl Maschinen im Sinne einfacher Anlagen als auch komplexe Anlagen bestehend aus mehreren Maschinen [161].

Analog hierzu wird eine Anlage genau einem Werk zugerechnet, da sich diese im genannten Werk befindet. Im Folgenden werden die Begriffe Werk, Abteilung, Fertigungsbereich sowie Produktionsstätte²³ oder Standort²⁴ synonym verwendet. Ein Werk ist genau einem geographischen Ort zuordenbar, welcher aus einem oder dem Verbund mehrerer Fertigungsbereiche bestehen kann. Ein Werk lässt sich genau einem Unternehmen²⁵ zurechnen. Unternehmen, Teilbereiche eines Unternehmens bzw. oftmals auch Unternehmen in ihrer Gesamtheit, lassen sich schließlich einer Branche²⁶ zurechnen [230].

²² Ein Produktionsprozess ist definiert als „Technologisch, zeitlich und örtlich bestimmtes effizientes Zusammenwirken von Produktionsfaktoren zur Herstellung einer bestimmten Gütermenge in bestimmter Qualität“ [233].

²³ Werk, Abteilung, Fertigungsbereich sind definiert als „Produktionsstätte, die als räumlich zusammenhängende Verwaltungseinheit innerhalb eines Unternehmens existiert“ [236].

²⁴ Standort ist definiert als „geografischer Ort, an dem ein Wirtschaftsbetrieb aktiv ist, d.h. Güter erstellt oder verwertet werden“ [234].

²⁵ Ein Unternehmen ist definiert als „eine wirtschaftlich-finanzielle und rechtliche Einheit, für die das erwerbswirtschaftliche Prinzip konstituierend ist“ [99].

²⁶ Branche ist definiert als „Sammelbezeichnung für Unternehmen, die weitgehend substituierbare Produkte oder Dienstleistungen herstellen (bspw. Automobilbranche, Elektronik, Pharmaindustrie). Als weitere Abgrenzungskriterien können die eingesetzte Fertigungstechnik oder die verwendeten Grundmaterialien herangezogen werden“ [66].

Produkt

Ein Produkt ist charakterisiert durch Material, Geometrie und Zustand. Der spezifische Zustand eines Produkts ist insbesondere abhängig vom Bearbeitungsstand. Der spezifische Bearbeitungsstand ist determiniert durch den Herstellungsprozess und damit verbunden mit dem spezifischen Energieverbrauch zur Erreichung dieses Bearbeitungszustandes.

In Anlehnung an das allgemeine Verständnis der Kostenrechnung lassen sich Produkte somit als Energieträger definieren. Entsprechend der allgemeingültigen Definition eines Energieträgers besitzen diese allerdings nicht die Fähigkeit, die ihnen durch den Bearbeitungsprozess zugeführte Energie in selbiger Form wieder freizusetzen.

Eine Sonderstellung nimmt deshalb das Bewertungsobjekt Produkt²⁷ als Stückgut²⁸ ein. Es steht strukturell senkrecht zu der vorweg beschriebenen Systematik der Betrachtungsebenen. Das Produkt selbst verbraucht bei seiner Herstellung keine Energie, jedoch die für dessen Erzeugung erforderlichen Prozesse. Die Bewertung der Energieeffizienz bezogen auf die Gesamtheit eines Produkts und dessen energieeffiziente Herstellung muss somit auf Basis der Verbrauchsstrukturen der spezifischen Prozesskette ermittelt werden.

8.2 Definition der Formen des Energieeinsatzes in der Produktion

Zur Ermittlung der Energieeffizienz ist neben einem Referenzwert die Kenntnis über den tatsächlichen Energieeinsatz erforderlich. Als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz zur Produktherstellung kann der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf, wie vorher dargestellt, berechnet werden.

Der tatsächliche Energieeinsatz muss während der Produktherstellung in Form einer Energieverbrauchsmessung erfasst werden. Diese gemessene Energiemenge, in Form eines absoluten Wertes, wird folgend als **tatsächlicher Energieverbrauch $E_{C,(x)}$** bezeichnet. Der Index c steht hierbei für *consumption*, dem englischen Begriff für Verbrauch. Der Index (x) stellt eine Variable dar und steht im späteren Verlauf für eine spezifische Betrachtungsebene, in Form einer zu bewertenden Produktionsstruktur oder dem Bewertungsobjekt Produkt, wie in Kapitel 8.1 beschrieben.

Entsprechend der Betrachtungsebene umfasst die Energieverbrauchsmessung verschiedene Messobjekte. Zur Spezifizierung der zu erfassenden Energieverbräuche für

²⁷ Ein Produkt der Stückgutproduktion im Sinne eines Sachgutes als „Ergebnis der Produktion und Sachziel einer Unternehmung oder auch Mittel der Bedürfnisbefriedigung. Einteilung in Sachgüter (materiell, Gebrauchsgüter und Verbrauchsgüter)“, Dienstleistungen (immateriell) und Energieleistungen“ [232].

²⁸ Ein Stückgut kann als Einzelstück transportiert werden. Es ist eine Güterart, die aus sich heraus verpackt oder mit einer Ladeinheit so formbeständig ist, dass sie bei Transport-, Lagerungs- und Umschlagsvorgängen als Beförderungseinheit zu behandeln ist [138]. Im Gegensatz hierzu stehen Massen- oder Prozessgüter, die einheitlich von einem großen Verbraucherkreis (Konsumenten oder Produzenten) nachgefragt werden und i. d. R. über einen langen Zeitraum produziert werden [231].

die jeweiligen Betrachtungsebenen, werden im Folgenden die Definitionen der verschiedenen Energieformen aufgegriffen, wie in Kapitel 2.2 detailliert erläutert. Anschließend erfolgt deren Zuordnung und Definition der Modalitäten der spezifischen Energieverbrauchsmessung für die jeweiligen Betrachtungsebenen.

Die Energieformen, „Primär-, Sekundär-, Bezugs-, End- und Nutzenergie“, werden im Kontext des industriellen Gebrauchs auf Basis der VDI-Norm 4661 [227] wie folgt definiert:

- **Primärenergie:** Der Energieinhalt von Energieträgern, von denen natürliche Vorkommnisse bestehen und die technisch noch nicht umgewandelt wurden, wird als Primärenergie bezeichnet [227].
- **Sekundärenergie:** Als Sekundärenergie wird der Energieinhalt von Energieträgern verstanden, welcher aus Primärenergieträgern durch einen oder mehrere technische Umwandlungsschritte gewonnen wurde [227].
- **Bezugsenergie:** Der Energieinhalt aller gehandelten primären sowie sekundären Energieträger, welche der Endkonsument bezieht, wird als Bezugsenergie bezeichnet [227].
- **Endenergie:** Endenergie beschreibt den Energieinhalt aller gehandelten Energieträger, welcher der Transformation beziehungsweise Generierung von Nutzenergie dient. Nach den Absprachen betreffend der Erstellung internationaler sowie nationaler Energiebilanzen entspricht die Endenergie dem Energieinhalt der Bezugsenergie, reduziert um den Energieeinsatz bei der Eigenerzeugung von Gas und Strom beim Endverbraucher und dem Energieinhalt des nichtenergetischen Verbrauchs [227].
- **Nutzenergie:** Alle vom Endverbraucher benötigten technischen Formen von Energie (Wärme, Licht, mechanische Energie, magnetische und elektrische Feldenergie sowie elektrische Strahlung) zur Ausführung von Energiedienstleistungen werden der Nutzenergie zugeordnet [227].

Die Produktherstellung stellt eine Transformation dar. Durch diese Transformation wird Nutzen generiert. Für die Durchführung einer Transformation ist Energie erforderlich. Per Definition bezieht somit ein Unternehmen zum Zweck der Produktherstellung Endenergie.

Die Endenergie umfasst den Energiegehalt aller gehandelten Energieträger und kann somit quantitativ erfasst werden. Der gemessene Energieverbrauch E_C beziffert somit eine Menge an Endenergie, die für einen bestimmten Zweck verbraucht wurde.

Der gemessene Energieverbrauch berücksichtigt nur produzierende Bereiche eines Unternehmens, da nur die Energieeffizienz der Produktion bewertet wird. In den produzierenden Bereichen eines Unternehmens kann die bezogene Endenergie auf folgende Arten verbraucht werden:

- **Verbrauch von Endenergie (E_{CM})**
zum Betrieb von Maschinen und Anlagen.
(bezeichnet mit dem Index CM für: consumption Maschine)
- **Verbrauch von Endenergie (E_{CB})**
zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen
(bezeichnet mit dem Index CB für: consumption Betriebsstoffe)
- **Verbrauch von Endenergie (E_{CN})**
zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie
(bezeichnet mit dem Index CN für: consumption Nutzenergie)

Der **gemessene Endenergieverbrauch E_{CM} beschreibt** den verbrauchten Energiegehalt aller eingesetzten Energieträger zum Betrieb von Maschinen und Anlagen zum Zweck der Produktion. Ferner beinhaltet er den Betrag der eingesetzten Endenergie zur Erzeugung aller für den Maschinenbetrieb eingesetzten Energieträger, reduziert um den Energieeinsatz bei der Eigenerzeugung von Gas und Strom beim Endverbraucher per Definition nach VDI-Norm 4661. Des Weiteren ist dem gemessenen Energieverbrauch E_{CM} der Betrag der eingesetzten Endenergie zur Bereitstellung der verbrauchten Energieträger an der Maschine zuzurechnen.

Der **gemessene Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen E_{CB} beschreibt** den verbrauchten Energiegehalt aller eingesetzten Energieträger zur Erzeugung aller eingesetzten Betriebsstoffe für den Produktionsbetrieb. Ferner beinhaltet er den Betrag der eingesetzten Endenergie zur Bereitstellung der verbrauchten Betriebsstoffe an einem bestimmten Betriebsmittel zum Zweck der Produktion.

Der **gemessene Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie E_{CN} beschreibt** den verbrauchten Energiegehalt aller eingesetzten Energieträger zur Erzeugung von Nutzenergie zum Zweck der Produktion. Der Begriff Nutzenergie beschreibt alle vom Endverbraucher benötigten technischen Formen von Energie (Wärme, Licht, mechanische Energie, magnetische und elektrische Feldenergie sowie elektrische Strahlung) zur Ausführung von Energiedienstleistungen [227]. Ferner beinhaltet er die eingesetzte Endenergie zur Erzeugung und Bereitstellung aller eingesetzten Betriebsstoffe zum Zweck der Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie. Darüber hinaus beinhaltet er den Betrag der eingesetzten Endenergie zur Bereitstellung der Nutzenergie am Einsatzort im produzierenden Bereich eines Unternehmens.

Zur Bewertung der Energieeffizienz der Produktherstellung ist die Erfassung aller beschriebenen Energieverbräuche erforderlich. Je nach Betrachtungsebene und Bewertungsobjekt muss jedoch differenziert werden, ob sich die jeweiligen Energieverbrauchsformen E_{CM} , E_{CB} , und E_{CN} direkt oder nur indirekt der Herstellung eines Produkts zurechnen lassen.

Der **gemessene Endenergieverbrauch E_{CM}** umfasst den tatsächlichen Endenergieverbrauch, der für die Ausführung einer definierten Grundoperation durch ein definiertes Verfahren auf einer bestimmten Anlage an einer Produktionsstätte erforderlich ist, in Form eines absoluten Wertes der hierfür notwendigen Energiemenge. Der E_{CM} wird durch einen absoluten Wert einer notwendigen Energiemenge dargestellt. Die Messung erfolgt während der Ausführung der Transformation an den eingesetzten Betriebsmitteln. Der E_{CM} lässt sich somit direkt einem Prozess für die Produktherstellung und somit einem Produkt zurechnen.

Der **produktspezifisch gemessene Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen $E_{CB,p}$** (der Index p steht hierbei für produktspezifisch) umfasst den tatsächlichen Endenergieverbrauch für die Erzeugung und Bereitstellung der erforderlichen Betriebsstoffe für die Ausführung einer definierten Grundoperation durch ein definiertes Verfahren auf einer bestimmten Anlage an einer Produktionsstätte. Der E_{CB} wird durch einen absoluten Wert einer notwendigen Energiemenge dargestellt. Die Erfassung erfolgt während der Ausführung der Transformation durch die Verbrauchsmessung der eingesetzten Betriebsmittel. Der $E_{CB,p}$ lässt sich somit direkt einem Prozess für die Produktherstellung und somit einem Produkt zurechnen.

Die beiden Endenergieformen E_{CM} und $E_{CB,p}$ lassen sich somit einem Prozess für die Produktherstellung und damit einem Produkt direkt zurechnen, ihre Erfassung findet jeweils direkt an der Maschine während der Produktherstellung statt. Sie sind Basis für die spätere Bewertung der Energieeffizienz der Betrachtungsebenen Prozess und Maschine. Des Weiteren bilden sie den Ausgangspunkt der Energieverbrauchsmessung für die Bewertung der darauf aufbauenden Betrachtungsebenen Werk, Unternehmen und Branche sowie zur Bewertung der Energieeffizienz der Herstellung eines Produkts.

Soll eine Bewertung der Energieeffizienz über die Prozessebene und Maschinenebene hinaus vorgenommen werden, entsprechend der vorher beschriebenen Pyramiden-darstellung, müssen die tatsächlichen Energieverbräuche differenziert betrachtet werden. Zur Analyse höherer Betrachtungsebenen ist die Messung des Energieverbrauchs auf Anlagen- bzw. Werksebene unerlässlich. Je nachdem auf welcher Betrachtungsebene die Energieverbrauchsmessung erfolgt, ergibt sich ein anderes Bündel an Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch, wie folgend dargestellt:

Der tatsächliche Energieverbrauch einer Produktionsstätte hängt von äußeren Einflussfaktoren ab, die zur Ermittlung der Energieeffizienz auf dieser Betrachtungsebene Berücksichtigung finden müssen. Hierzu zählen insbesondere Lichtverhältnisse und das Klima. Diese wirken sich vor allem auf den Energieverbrauch der Peripherie des Werkes in Abhängigkeit von dessen geografischer Lage, aus. Der Energiebedarf für die Peripherie lässt sich nicht direkt einer Produktionsanlage zurechnen, ist aber trotzdem unerlässlich für die Produktion. Die Energieverbräuche der Peripherie werden in

Anlehnung an den Begriff der Gemeinkosten²⁹ aus der Kostenrechnung deshalb als Gemeinenergie bezeichnet. Die Gemeinenergie bezeichnet während der Produktion anfallende Energieverbräuche, die sich einem bestimmten Prozess, einer bestimmten Maschine oder einem bestimmten Produkt nicht exakt zurechnen lassen. Diese nicht produktspezifisch zuordenbaren Energieverbräuche lassen sich durch die Energieverbräuche zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie und nicht produktspezifisch eingesetzten Betriebsstoffen quantifizieren.

Gemeinenergiebedarfe werden durch Entscheidungen determiniert, die das betrachtete Bezugsobjekt, in Form einer Produktionsstruktur oder eines Produkts, und weitere Bezugsobjekte gemeinsam betreffen. Dies gilt, sofern Energieverbräuche, auch bei Anwendung bester Erfassungsmethoden, dem betrachteten Bezugsobjekt nach dem Identitätsprinzip nicht explizit zugerechnet werden können. Eine direkte Zurechnung ist erst bei einem übergeordneten Bezugsobjekt möglich. In diesem Kontext lassen sich z.B. die Nutzenergieformen wie Raumwärme, Beleuchtung, Klimakälte sowie Informations- und Kommunikationstechnik als wichtigste Gemeinenergiekomponenten identifizieren [5] [81] [238]. Darüber hinaus gibt es weitere Formen der Nutzenenergie, die produktionsspezifisch eingesetzt werden. Dies können alle technischen Formen von Energie sein. Zusammengefasst werden diese technischen Formen von Energie als Nutzenergie beschrieben, die sich im Sinne des Begriffs Gemeinenergie nicht direkt einem Produkt zuordnen lässt. Das gleiche gilt für den Verbrauch von Betriebsstoffen, die nicht unmittelbar an der Produktionsmaschine zur Prozessausführung eingesetzt werden und sich somit nicht direkt einem Produkt zurechnen lassen. Der Energieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen, die nicht einem Produkt zurechenbar sind, lässt sich ebenso dem Gemeinenergiebedarf zuschreiben.

Jedoch gibt es auch technische Formen von Energie, also Nutzenergie, die erst bei der Betrachtung höherer Ebenen, über die Prozess- und Maschinenebene hinaus, für die Produktherstellung bereitgestellt werden müssen und sich direkt einem Produkt zuordnen lassen. In diesem Kontext lässt sich z.B. die erforderliche Nutzenergie für die spezifische Lagerung eines Produkts im Rahmen eines Produktionsprozesses nennen. Darüber hinaus gibt es weitere technische Formen von Energie, die produktonspezifisch eingesetzt werden, und sich einem bestimmten Produkt zuordnen lassen. Dies können alle technischen Formen von Energie sein. Zusammengefasst werden diese technischen Formen von Energie, beschrieben als Nutzenergie, die sich direkt einem Produkt zuordnen lassen.

²⁹ „Gemeinkosten bezeichnen allgemein Kosten, die sich einer bestimmten Bezugsgröße (z.B. Produkt) nicht exakt zurechnen lassen. (Echte) Gemeinkosten werden durch Entscheidungen ausgelöst, die das betrachtete Bezugsobjekt und weitere Bezugsobjekte gemeinsam betreffen, soweit sie auch bei Anwendung bester Erfassungsmethoden für das betrachtete Bezugsobjekt nicht getrennt erfasst und ihm auch nicht nach dem Identitätsprinzip eindeutig zugerechnet werden können. Das ist erst bei einem übergeordneten Bezugsobjekt möglich. [238]

Aufgrund der Differenzierung zwischen nicht möglicher und direkter Zuordenbarkeit des **gemessenen Endenergieverbrauchs zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie E_{CN}** zu einem Produkt, ergeben sich folglich zwei Formen des E_{CN} . Beide Formen müssen zur Energieeffizienzbewertung einer bestimmten Betrachtungsebene differenziert erfasst werden. Somit lässt sich der gemessene Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie E_{CN} durch folgende zwei Größen darstellen:

Der **produktspezifisch gemessene Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie $E_{CN,p}$** (der Index p steht hierbei für *produktspezifisch*) umfasst den tatsächlichen Endenergieverbrauch für die Erzeugung und Bereitstellung der erforderlichen Nutzenergie zum Zweck der Produktion eines bestimmten Produkts. Der $E_{CN,p}$ wird durch einen absoluten Wert einer notwendigen Energiemenge dargestellt. Die Erfassung erfolgt durch die Verbrauchsmessung der eingesetzten Betriebsmittel zur Erzeugung und Bereitstellung der Nutzenergie, die einem Produkt direkt zurechenbar ist. Der $E_{CN,p}$ lässt sich einem für die Produktherstellung erforderlichen Prozess und somit einem Produkt zurechnen.

Der **global gemessene Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie $E_{CN,g}$** (der Index g steht hierbei für *global im Sinne von Gemeinenergie /-nutzen zum Betrieb der Produktionsstätte*) umfasst den nicht produktspezifisch zuordenbaren tatsächlichen Endenergieverbrauch, für die Erzeugung und Bereitstellung der erforderlichen Nutzenergie zum Zweck der Produktion. Der $E_{CN,g}$ wird durch einen absoluten Wert einer notwendigen Energiemenge dargestellt. Die Erfassung erfolgt durch die Verbrauchsmessung der eingesetzten Betriebsmittel zur Erzeugung und Bereitstellung der Nutzenergie, die einem Produkt nicht direkt zurechenbar ist. Der $E_{CN,g}$ lässt sich nach dem Identitätsprinzip nicht einem, für die Produktherstellung erforderlichen Prozess und somit nicht einem Produkt direkt zurechnen. Die technischen Formen der nicht produktspezifischen Nutzenergie werden zusammenfassend auch als Gemeinenergie bezeichnet.

Analog dem global gemessenen Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie wird an dieser Stelle der **global gemessene Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen $E_{CB,g}$** (der Index g steht hierbei für *global im Sinne von Gemeinenergie /-nutzen zum Betrieb der Produktionsstätte*) eingeführt. Der $E_{CB,g}$ umfasst den nicht produktspezifisch zuordenbaren tatsächlichen Endenergieverbrauch für die Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen zum Zweck der Produktion. Der $E_{CB,g}$ wird durch einen absoluten Wert einer notwendigen Energiemenge dargestellt. Die Erfassung erfolgt durch die Verbrauchsmessung aller eingesetzten Betriebsstoffe, die einem Produkt nicht direkt zurechenbar sind. Der $E_{CB,g}$ lässt sich nach dem Identitätsprinzip nicht einem, für die Produktherstellung erforderlichen Prozess und somit nicht einem Produkt direkt zurechnen. Der $E_{CB,g}$ wird dementsprechend dem Gemeinenergiebedarf zugerechnet.

8.3 Modalitäten der Erfassung des tatsächlichen Energieverbrauchs in der Produktion

Um eine übergreifende Vergleichbarkeit zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass die Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch durch das Bewertungsobjekt immer in gleicher Form berücksichtigt werden. Aufgrund dessen ist eine einheitliche Festlegung der Modalitäten der Energieverbrauchsmessung erforderlich.

Die Ermittlung des Energieverbrauchs findet immer an dem Betriebsmittel statt, welches Endenergie zum Zweck der Produktion verbraucht. Dies gilt ebenso für alle Betriebsmittel zur Selbsterzeugung von Energieträgern, Betriebsstoffen oder Nutzenergie, aller Formen und deren Verteilung. Die Höhe des Energieverbrauchs entspricht dem Betrag des verbrauchten Endenergiegehalts aller eingesetzten Energieträger. Die Messung selbst ist unter Einsatz eines fähigen Messgeräts durchzuführen, das den Richtlinien der Qualitätssicherung entspricht. Der Erfassung obliegen grundsätzlich die vier vorweg beschriebenen Arten des tatsächlichen Energieverbrauchs:

- gemessener **Endenergieverbrauch** E_{CM} an der Maschine
- **produktspezifisch** gemessener Endenergieverbrauch zur **Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen** $E_{CB,p}$
- **global** gemessener Endenergieverbrauch zur **Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen** $E_{CB,g}$
- **produktspezifisch** gemessener Endenergieverbrauch zur **Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie** $E_{CN,p}$
- **global** gemessener Endenergieverbrauch zur **Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie** $E_{CN,g}$

Zur Ermittlung der Energieeffizienz der vorweg dargestellten Betrachtungsebenen variiert der Umfang der Energieverbrauchserfassung. Die Energieverbrauchsmessung ist charakterisiert durch das Messobjekt und die Dauer der Messung. Die Dauer der Messung und das Messobjekt werden determiniert durch die Betrachtungsebene und das Betrachtungsobjekt. Darüber hinaus ist die Erfassung aller Arten des tatsächlichen Energieverbrauchs nicht für jede Betrachtungsebene erforderlich, wie im Folgenden näher spezifiziert wird.

Modalitäten der Energieverbrauchsmessung zur Bewertung eines Prozesses

Bei der Betrachtung eines spezifischen Prozesses soll die Energieeffizienz der reinen Prozessdurchführung bewertet werden. Bei diesem Prozess handelt es sich um einen zeitlich und örtlich bestimmten technologischen Vorgang zur Umsetzung einer definierten Transformation, im Rahmen der gesamten Prozesskette zur Herstellung eines Produkts. Maschinen- und planungsbedingte Einflussfaktoren sollen zur Energieeffizienzbewertung auf Prozessebene möglichst eliminiert werden. Betrachtet wird eine Prozessdurchführung. Aufgrund dessen wird die Energieverbrauchserfassung erst im eingeschwungenen Betriebszustand vorgenommen. Dadurch wird der Energiever-

brauch während Rüst- und Anlaufphase nicht mit erfasst. Der tatsächliche Energieverbrauch wird an den prozessausführenden Betriebsmitteln für die Dauer der einmaligen Durchführung eines Prozesses, in Form des E_{CM} und $E_{CB,p}$ erfasst. Abbildung 48 visualisiert den Zeitraum der Messung im eingeschwungenen Betriebszustand für die Prozessbewertung (*Zeitraum der Messung (Prozess)*).

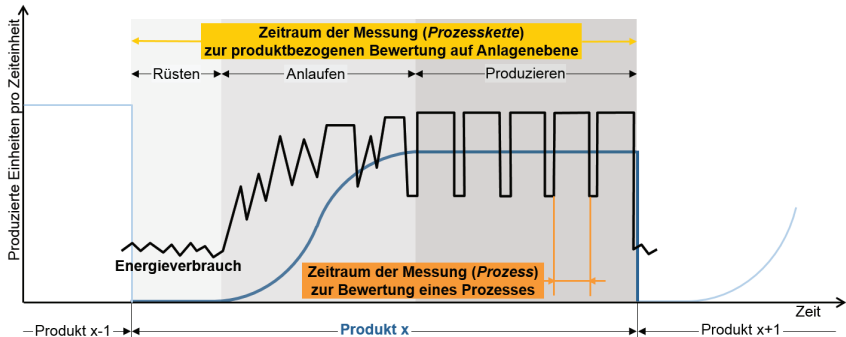


Abbildung 48: Visualisierung des Zeitraums der Energieverbrauchsmessung [130]

Modalitäten der Energieverbrauchsmessung zur Bewertung von Anlagen

Bei der Betrachtung einer bestimmten Anlage soll die Energieeffizienz der Anlage in Bezug auf die Durchführung einer oder mehrerer produktspezifischer Prozessketten bewertet werden. Der tatsächliche Energieeinsatz auf Anlagenebene wird im Vergleich zum tatsächlichen Energieverbrauch bei der reinen Prozessbetrachtung von zusätzlichen Faktoren beeinflusst. Um eine hohe Vergleichbarkeit der Energieeffizienz von verschiedenen Maschinen oder Anlagen zu gewährleisten, muss sichergestellt sein, dass die Bewertungsobjekte die gleichen sind. Während der Rüstphase konsumiert die Anlage Energie, obwohl nichts produziert wird. Darüber hinaus wird in der Anlaufphase unter Umständen ungleich mehr Energie pro produzierter Einheit benötigt, als im darauffolgenden eingeschwungenen Betriebszustand der Produktion. Dies wirkt sich auf die Energieeffizienz der Herstellung eines Produkts aus. Die Messung des Energieverbrauchs zur Herstellung eines Produkts muss deshalb nicht nur die Produktion im eingeschwungenen Betriebszustand erfassen, sondern darüber hinaus auch Rüst- und Anlaufphase einbeziehen (siehe Abbildung 48: *Zeitraum der Messung (Prozesskette)*). Für jede produktspezifische Prozesskette wird die Messung für die Dauer der Produktion einer produkttypischen Losgröße in Form eines produkttypischen Fertigungsauftrages, auf der Anlage durchgeführt. Die Messdauer beginnt mit dem Rüsten der Anlage für das Produkt und endet mit dem letzten für den Fertigungsauftrag erforderlichen produzierten Gutteil. Dies gilt für die Bewertung einer Anlage in Bezug auf ein bestimmtes Produkt. Werden auf der Anlage mehrere unterschiedliche Produkte gefertigt, kann die Bewertung der Energieeffizienz der Anlage ebenso produktübergreifend dargestellt werden.

Dies dient zur Bewertung der Energieeffizienz einer bestimmten Anlage, bezogen auf den Anlageneinsatz zur Herstellung eines bestimmten Produktspektrums. Die Messdauer beginnt für diesen Zweck mit dem Rüsten der Anlage für das erste Produkt. Die Dauer der Messung umfasst die einmalige Ausführung einer produkttypischen Losgröße in Form eines Fertigungsauftrages für jedes Produkt und endet mit dem letzten erforderlichen produzierten Gutteil. Dadurch wird der Einflussfaktor der Produktionssteuerung möglichst realitätsgetreu abgebildet.

Des Weiteren muss in jedem Fall der produzierte Ausschuss berücksichtigt werden, da die Anlage auch während der Produktion von Ausschussteilen (oder Warmfahrteilen) Energie verbraucht. Der tatsächliche Energieverbrauch wird für die gesamte Anlage während der definierten Messdauer, in Form des E_{CM} und des E_{CB} erfasst.

Modalitäten der Energieverbrauchsmessung zur Bewertung eines Werks

Da die Aufteilung in Abteilungen, Werke oder Standorte je Unternehmen individuell ist, wird im Folgenden synonym der Begriff Werk verwendet.

Die Einteilung obliegt geographischen und organisatorischen Gegebenheiten. Dies gilt es für die Systemgrenzen der Betrachtung, entsprechend der individuellen Einteilung der Betrachtungsebenen (Abteilung, Werk, Standort), zu berücksichtigen. Auf Grund dieser individuellen Einteilung kann unter Umständen der tatsächlich erforderliche Energieeinsatz beeinflusst werden, je nachdem welchem Umfang die Systemgrenze der jeweiligen Betrachtungsebene obliegt.

Bei der Betrachtung eines bestimmten Werks soll die Energieeffizienz des Werks in Bezug auf die Produktion aller Teile an diesem Ort bewertet werden. Der tatsächliche Energieeinsatz auf Werksebene wird im Vergleich zum tatsächlichen Energieverbrauch bei der Anlagenbetrachtung von zusätzlichen Faktoren beeinflusst. Um eine hohe Vergleichbarkeit der Energieeffizienz von verschiedenen Werken zu gewährleisten, muss sichergestellt sein, dass die Bewertungsobjekte die gleichen sind.

Auf Werksebene kommen im Vergleich zur Anlagenebene zusätzliche Einflussfaktoren auf den erforderlichen Energieeinsatz durch die Produktionsumgebung hinzu. Diese wirken sich vor allem auf den Energieverbrauch der Peripherie des Werkes aus, welcher sich unter Umständen nicht direkt einer Produktionsanlage oder einem Produkt zurechnen lässt, aber unerlässlich für die Produktion ist. Zur Aufrechterhaltung des Produktionsbetriebs in einem bestimmten Werk ist es also erforderlich, dieses mit Nutzenergie und Betriebsstoffen zu versorgen. Die Nutzenergie umfasst alle technischen Formen von Energie. Dies umfasst neben Licht und Wärme auch mechanische Energie, magnetische und elektrische Feldenergie sowie elektrische Strahlung. Die erforderliche Nutzenergie, die im Rahmen der Produktion bereitzustellen ist, ist differenziert zu betrachten. Zum einen gibt es Formen der erforderlichen Nutzenergie, die sich anteilig einem bestimmten Produkt zurechnen lassen, zum anderen gibt es erforderliche Anteile der gesamten Nutzenergie, die nicht einem bestimmten Produkt direkt

zugerechnet werden können. Gleiches gilt auch für die Versorgung des Werks mit erforderlichen Betriebsstoffen aller Art.

Die direkte Zurechenbarkeit obliegt nicht den Formen der Nutzenergie, sondern der räumlichen Werksgestaltung der individuellen Produktionsumgebung. Wird z.B. in einem bestimmten Raum des Werks nur ein bestimmtes Produkt gefertigt, so lässt sich der Nutzenergiebedarf an Licht und Wärme für diesen Raum genau diesem Produkt zurechnen. Verfügt das Werk darüber hinaus jedoch z.B. über eine zentrale Kühlt-Schmierstoff-Aufbereitungsanlage, so lässt sich die erforderliche Endenergie für deren Betrieb nicht zwangsläufig einem bestimmten Produkt direkt zurechnen. Ebenso verhält es sich mit zentral genutzter Informations- und Kommunikationstechnologie. Des Weiteren obliegt der Bedarf der Nutzenergie für ein Werk saisonalen Witterungsbedingungen. Je nach Jahreszeit unterscheidet sich der Bedarf an Nutzenergie zur Aufrechterhaltung des Produktionsbetriebes. In kälteren und dunkleren Monaten steigt der Nutzenergiebedarf in Form von Wärme und Licht, bzw. führt noch zusätzliche Bedarfe technischer Energieformen mit sich. In wärmeren und helleren Monaten sinkt der Nutzenergiebedarf dieser Formen und wird in Form anderer technischer Energieformen erforderlich. Aus diesem Grund ist die Erfassung aller Energieverbräuche über den Zeitraum von einem vollen Jahr durchzuführen.

Des Weiteren sind die Anzahl sowie der Ausschussanteil aller gefertigten Teile, wie bei der Bewertung auf Anlagenebene, zu berücksichtigen. Der tatsächliche Energieverbrauch wird für alle Anlagen, die für die Produktion des Produktspektrums eingesetzt werden, während der definierten Messdauer von einem Jahr in Form des E_{CM} und $E_{CB,p}$ an den produzierenden Anlagen erfasst. Darüber hinaus ist die Erfassung des produktspezifisch gemessenen Endenergieverbrauchs zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie $E_{CN,p}$, die Erfassung des global gemessenen Endenergieverbrauchs zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie $E_{CN,g}$ und die Erfassung des global gemessenen Endenergieverbrauchs zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen $E_{CB,g}$ erforderlich. Die Erfassung der hierzu eingesetzten Endenergie geschieht in Abhängigkeit des Produktspektrums an den jeweiligen Betriebsmitteln, die für die Erzeugung und Bereitstellung der Nutzenergie und Betriebsstoffe eingesetzt werden.

Modalitäten der Energieverbrauchsmessung zur Bewertung eines Unternehmens, einer Branche und der Herstellung eines Produkts

Die Bewertung der Energieeffizienz eines Unternehmens, einer Branche und der Herstellung eines Produkts geschieht auf Basis der Energieverbrauchsmessung auf Werksebene. Dementsprechend gelten für die Bewertung des Unternehmens, der Branche und des Produkts die Modalitäten der Energieverbrauchsmessung wie für die Energieeffizienzbewertung der Werksebene vorweg beschrieben.

8.4 Definition der Kennzahl Relative Energieeffizienz (REE)

Effektivität bewertet die Zielerreichung, lässt dabei jedoch den Aufwand, der zu ebendieser betrieben werden muss, außer Acht [103]. Folglich stellt die Effektivität eine reine Nutzenbetrachtung dar [35]. Der Effizienzbegriff geht über den der Effektivität hinaus, da zur Bewertung der Effizienz die Zielerreichung, also die Effektivität, vorausgesetzt wird. Die Effizienzdefinition, die in der Fachliteratur die größte Präsenz aufweist, setzt Output und Input, oder anders ausgedrückt Nutzen und Aufwand, ins Verhältnis [55]. Die Produktivität errechnet sich ebenfalls aus dem Quotienten von Output und Input [87] (Vergleiche hierzu Kapitel 2.2). Während die Produktivität eine reine Nutzenbetrachtung darstellt, unterliegt die Effizienz dem ökonomischen Prinzip, welches im Zusammenhang mit Effizienz zwei Ausprägungen kennt [187]. Effizienz liegt genau dann vor, wenn bei konstantem Output der Input minimiert wird, wohingegen nach dem Maximumprinzip eine Maximierung des Outputs bei konstantem Input angestrebt wird [86].

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \qquad \text{Gleichung 37}$$

Anhand dieser Definition der Effizienz lässt sich lediglich eine Aussage darüber treffen, ob Effizienz oder Ineffizienz, im Vergleich zu einem definierten Nutzen-Aufwand-Verhältnisses, vorliegt. Soll eine Aussage darüber getroffen werden, in welchem Grad Effizienz vorliegt, ist dies mit der vorliegenden Definition nicht möglich. Im energetischen Kontext wird Effizienz auch als Verhältnis aus gewünschtem Nutzen und dem damit verbundenen, minimal notwendigen Energieeinsatz ausgedrückt [167]. Aufgrund dessen bietet die vorliegende Definition im energetischen Kontext nur eine stark eingeschränkte Vergleichbarkeit, nämlich lediglich identischer Vergleichsobjekte. Demzufolge kann für unterschiedliche Produkte als Vergleichsobjekt keine Aussage darüber getroffen werden, welches Produkt energieeffizienter, sondern lediglich, welches Produkt unter geringerem Energieeinsatz herstellt wurde. Mit dem Ziel der übergreifenden Vergleichbarkeit durch die Bemessung der Energieeffizienz wird auf einen anderen Ansatz zur Definition der Energieeffizienz zurückgegriffen. Der folgende Ansatz zur Bestimmung der Effizienz berücksichtigt neben dem gemessenen Ist-Wert auch einen Referenzwert [139]:

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Ist} - \text{Wert}}{\text{Referenzwert}} \qquad \text{Gleichung 38}$$

Die beiden Größen Ist-Wert und Referenzwert werden ausgehend von der Energieproduktivität (in Anlehnung an die Ressourcenproduktivität) bestimmt, die auf Basis der Produktivität definiert ist, als [139] [121]:

$$\text{Energieproduktivität} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\text{Output}}{\text{Energieeinsatz}} \quad \text{Gleichung 39}$$

Hierbei ist der Output in Form eines Produkts definiert. Zur Gewährleistung eines Vergleichs verschiedener Produkte muss dieser Term substituiert werden. Unter dieser Prämisse lässt sich auf Basis der Energieproduktivität ein aussagekräftiger Ansatz zur Bewertung der Energieeffizienz definieren [139] [121]. Der Wert, der die ideale, anzustrebende Energieproduktivität in Relation zur tatsächlichen setzt, wird als Relative Energieeffizienz (*REE*) bezeichnet:

$$\text{Relative Energieeffizienz} = \frac{\text{Tatsächliche Energieproduktivität}}{\text{Ideale Energieproduktivität}} \quad \text{Gleichung 40}$$

mit

$$\text{Ideale Energieproduktivität} = \frac{\text{Output}}{\text{Minimaler Energieeinsatz}}$$

$$\text{Tatsächliche Energieproduktivität} = \frac{\text{Output}}{\text{Tatsächlicher Energieeinsatz}}$$

In Abgrenzung zur vorher erläuterten Effizienzdefinition (Gleichung 37), die Output und Input ins Verhältnis setzt, stellt das Verhältnis von tatsächlicher zu idealer Produktivität ein Maß der Effizienz dar. Dieser Ansatz setzt die Kenntnis der idealen, das heißt der maximal realisierbaren Produktivität voraus. Die ideale Energieproduktivität errechnet sich aus dem Verhältnis von gegebenem Output und minimalem Energieeinsatz. Die tatsächliche Energieproduktivität ergibt sich durch Gegenüberstellung von entstandenem Output sowie derjenigen Energie, die tatsächlich zu dessen Erzeugung eingesetzt wurde. Bei gleichem Nutzen lässt sich dieser kürzen und die relative Energieeffizienz ist die Relation von minimalem und tatsächlichem Energieeinsatz: [129]

$$\text{Relative Energieeffizienz} = \frac{\text{Minimaler Energieeinsatz}}{\text{Tatsächlicher Energieeinsatz}} \quad \text{Gleichung 41}$$

Damit ergibt sich ein einheitsloser Ergebniswert im Wertebereich]0;1] bzw.]0;100%], wobei eine relative Energieeffizienz von 100% anzustreben ist. Diese Definition erlaubt eine eigenständige Bewertung der Energieeffizienz in allgemeiner Form. Somit stellt das Ergebnis ein absolutes Maß der Energieeffizienz dar. Nachdem der Referenzwert „Minimaler Energieeinsatz“ in Abhängigkeit des Vergleichsobjekts jedoch einen spezifischen Wert einnimmt, wird der Ergebniswert fortan als „Relative Energieeffizienz“ (*REE*) bezeichnet. Dadurch sind die Bemessung und der übergreifende Vergleich der Energieeffizienz möglich. Es handelt sich bei dem Referenzwert „Minimaler Energieeinsatz“ nicht um eine Naturkonstante.

Entspricht der tatsächliche Energieeinsatz zur Erzeugung eines gewünschten Nutzens dem minimalen, ergibt sich für die Relative Energieeffizienz ein Wert von 1 beziehungsweise 100%. In diesem Fall liegt absolute Energieeffizienz vor. Entspricht der minimale Energieeinsatz unter idealen Bedingungen allerdings dem Wert Null, so ist der Quotient der REE mathematisch nicht definiert. Nach der Gesetzmäßigkeit des Energieerhaltungssatzes ist für die Erreichung eines gewünschten Zustandes in diesem Fall keine Energie erforderlich. Tatsächlich kann allerdings zur Erreichung des gewünschten Zustandes Energie eingesetzt und verbraucht werden. Es liegt somit Ineffizienz vor. Deutlich wird dies an der Differenz zwischen minimalem Energiebedarf und tatsächlichem Energieeinsatz. Die Differenz beschreibt die auftretenden Energieverluste für die gewünschte Zustandsänderung.

$$\text{Verlust} = \text{Tatsächlicher Energieeinsatz} - \text{Minimaler Energiebedarf}$$

Gleichung 42

Wird im Zuge einer Zustandsänderung Energie freigesetzt, kann diese theoretisch genutzt werden. Wird sie innerhalb des betrachteten Systems genutzt, vermindert sich der tatsächliche Energieeinsatz für die gewünschte Zustandsänderung. Der Vorgang wird energieeffizienter durchgeführt. Entspricht der Betrag der eingesetzten Energie dem minimalen Energiebedarf ist der Verlust gleich Null, es folgt absolute Effizienz. Besitzt der minimal erforderliche Energiebedarf ein negatives Vorzeichen, so setzt das System bereits zum Betrachtungszeitpunkt Energie frei. Wird diesem System zusätzliche Energie zugeführt liegt ebenfalls Ineffizienz vor.

Im Bereich der Produktion können diese beschriebenen Fälle eintreten. Ein Produktionsprozess ist energetisch determiniert durch einen spezifischen Mindestenergiebedarf und dem zur Durchführung tatsächlich angefallenen Energieverbrauch. Zur Bewertung der Energieeffizienz eines Produktionsprozesses wird in Folge dessen die Relative Energieeffizienz mathematisch auf Basis der Gleichung 41 wie folgt definiert:

$$REE = \left(1 - \frac{(\text{Tatsächlicher Energieverbrauch} - \text{Mindestenergiebedarf})}{\text{Tatsächlicher Energieverbrauch}} \right) \cdot 100\%$$

Gleichung 43

Demzufolge gibt die Relative Energieeffizienz (*REE*) Aufschluss über den Zielerreichungsgrad der absoluten Energieeffizienz eines Produktionsprozesses. Ihre Darstellung erfolgt in Prozent [%]. Ist der Wert der *REE* kleiner Null, so liegt Ineffizienz vor. Ist der Wert der *REE* größer 100%, so ist der betrachtete Vorgang absolut effizient und es wird zudem Energie freigesetzt. Darüber hinaus gestattet die *REE* eine Aussage über das theoretisch mögliche Energieeinsparpotenzial [129]. Die *REE* ist Maß für die Energieeffizienz und erlaubt dadurch einen übergreifenden Vergleich.

8.5 Ermittlung und Anwendungsfelder der Kenngröße Relative Energieeffizienz zum Einsatz in produzierenden Unternehmen

Für einen internen, externen und übergreifenden Vergleich der Energieeffizienz wird der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf (E_{GM}) unter idealen Bedingungen als Referenzwert verwendet. Die tatsächlichen Energieverbräuche der jeweiligen Betrachtungsebene fließen als $E_{c(x)}$ in die Berechnung. Der Index x steht hierbei für die jeweilige zu bewertende Betrachtungsebene, wie unter Kapitel 8.1 beschrieben. Dadurch lässt sich die $REE_{(x)}$ einer spezifischen Betrachtungsebene allgemein bestimmen als:

$$REE_{(x)} = \left(1 - \frac{(E_{c(x)} - E_{GM})}{E_{c(x)}} \right) \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 44}$$

Aufgrund der Rückführbarkeit auf physikalische und chemische Gesetzmäßigkeiten, entsprechend der gezeigten Modellvorstellungen, bietet der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf eine unabhängige Vergleichsbasis. Ein Produkt X kann unter Einsatz zweier verschiedener Produktionsmethoden auf zwei unterschiedlichen Maschinen gefertigt werden. Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf ist jedoch in beiden Fällen gleich, da es sich um dieselbe Grundoperation handelt. In Abbildung 49 ist dieser Zusammenhang dargestellt.

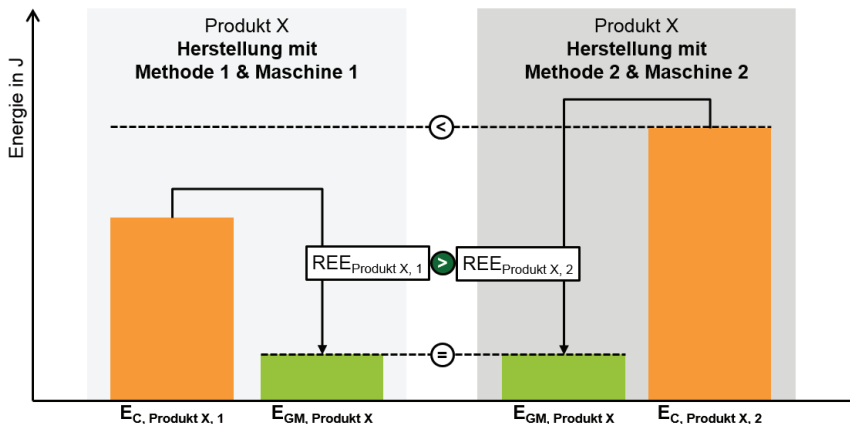


Abbildung 49: Vergleichbarkeit der REE auf Basis des EGM [135]

Folgende Darstellung zeigt die Relationen zwischen den unterschiedlichen Energieverbrauchsmeasurements und dem berechneten grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarf zur Darstellung der Analyseobjekte, für welche die *Relative Energieeffizienz* (REE) ermittelt werden kann:

Hierzu werden Mindestenergiebedarfsberechnung und Energieverbrauchsmessung getrennt voneinander betrachtet.

In Folge der Berechnung können folgende zu bestimmende Werte für den grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarf bezogen auf ein bestimmtes Produkt identifiziert werden:

- **$E_{GM,Prozess}$**
grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf für die Durchführung eines bestimmten Prozesses für die Herstellung des Produkts
- **$E_{GM,PK}$**
grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf für die Durchführung einer bestimmten Prozesskette (*PK*) für Herstellung des Produkts
- **$E_{GM,Produkt}$**
grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf für die Durchführung aller Prozessketten zur Herstellung des Produkts

Auf der Seite der Energieverbrauchsmessung erfolgt die Unterscheidung entsprechend der Betrachtungsebenen, wie unter Kapitel 8.1 beschrieben, die sich jeweils auf die Herstellung eines bestimmten Produkts beziehen. Somit lassen sich folgende Größen messtechnisch erfassen:

- **$E_{C,Prozess}$**
Energieverbrauch für die Durchführung eines bestimmten Prozesses
- **$E_{C,Anlage}$**
Energieverbrauch für die Durchführung einer bestimmten Prozesskette
- **$E_{C,Werk}$**
Energieverbrauch für die Durchführung bestimmter Prozessketten im Werk
- **$E_{C,Unternehmen}$**
Energieverbrauch aller dem Unternehmen zugeordneten Werke
- **$E_{C,Produkt}$**
Energieverbrauch zur Herstellung des Produkts

Im folgenden Kapitel wird die Bewertung der Energieeffizienz auf Basis des Mindestenergiebedarfs anhand eines Versuchsaufbaus verifiziert und für einen Fertigungsprozess experimentell dargestellt.

Anschließend wird die Berechnung der vorweg dargestellten Größen zur Bewertung der Energieeffizienz der spezifischen Betrachtungsebenen in einem produzierenden Unternehmen detailliert erläutert. Darüber hinaus wird das Vorgehen zur Bestimmung der Energieeffizienz für die Herstellung eines Produkts dargestellt, und ferner die Aggregation zur Bewertung der Energieeffizienz einer Branche.

9 Verifizierung und experimentelle Darstellung der Mindestenergiebedarfsbestimmung im Versuch

Im folgenden Kapitel wird die Bestimmbarkeit des Mindestenergiebedarfs für eine Transformation auf Basis der eingangs beschriebenen Modellvorstellungen verifiziert. Der Mindestenergiebedarf wird, wie vorweg beschrieben, unter idealen Annahmen berechnet. Eine direkte Messung des Mindestenergiebedarfs unter realen Umgebungsbedingungen ist somit ausgeschlossen. Aus diesem Grund wird der Mindestenergiebedarf für den Trennvorgang eines Probekörpers berechnet. Der berechnete Mindestenergiebedarf wird der mechanischen Arbeit, die zum Trennen tatsächlich aufgewendet wird, gegenübergestellt. Die tatsächlich aufgewendete mechanische Arbeit wird während des Trennvorgangs messtechnisch erfasst. Durch den Messaufbau sollen Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch eliminiert werden, um den Mindestenergiebedarf in Form der zugeführten mechanischen Arbeit in einer möglichst vergleichbaren Größenordnung zu erfassen. Die Versuchsdurchführung geschieht anhand des Trennvorgangs von Korund, einem sehr spröden, homogenen Material. Das Material liegt in sehr reinem Zustand vor, die Gitterstruktur und Korngrößen sind bekannt. Das Material neigt zu keinerlei plastischer Verformung. Dieses Verhalten bietet den Vorteil, dass die Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch durch die Imperfektion des Materials bekannt sind. Auf Basis der Versuchsdurchführung wird die Korrelation zwischen der versuchstechnisch bestimmten erforderlichen Arbeit und dem anhand der Modellvorstellungen berechneten Mindestenergiebedarf analysiert. Anschließend wird die operative Bestimmung des Mindestenergiebedarfs dargestellt. Zur weiteren Validierung wird die Bewertungsmethode auf Basis des Mindestenergiebedarfs für die Grundoperation Biegen am Beispiel eines Probekörpers aus Kupfer und am Beispiel des Wickelns einer Spule dargestellt.

9.1 Verifizierung des Mindestenergiebedarfs und dessen Bestimmbarkeit auf Basis der Modellvorstellungen

Zur Verifizierung des atomphysikalischen Modells wird eine Versuchsreihe, zur messtechnischen Ermittlung der Biegearbeit und der zugehörigen Werkstoffkennwerte, durchgeführt.

Parallel dazu wird der E_{GM} anhand der Werkstoffkennwerte aus den Herstellerangaben und der Literatur, für den makroskopisch eingesetzten Probekörper, ideal berechnet. Diese beiden Werte werden, mit dem theoretisch berechneten Wert für den E_{SM} , auf Basis der mikroskopischen Modellvorstellungen für den eingesetzten Probekörper, verglichen.

Es soll gezeigt werden, dass sich die Berechnung des E_{GM} unter idealen Bedingungen auf die mikroskopischen Modellvorstellungen zurückführen lässt, und sich der E_{GM} somit als Referenzwert für die REE eignet. Zusätzlich soll anhand dieses Versuchs ge-

zeigt werden, dass die Bestimmung des Mindestenergiebedarfs, für die Transformation eines makroskopisch eingesetzten Werkstoffes, unter Umständen nicht auf Basis atomarer Zusammenhänge der mikroskopischen Ebene erfolgen kann.

Abschließend wird die in diesem Versuch angewandte Systematik, zur Verifizierung des atomphysikalischen Modells zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs übertragen. Die Übertragung der Systematik erfolgt zur theoretischen Verifizierung des chemischen, thermodynamischen und werkstoffwissenschaftlichen Modells zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs.

9.1.1 Versuchsdurchführung und messtechnische Bestimmung der Biegearbeit als Vergleichsbasis für den E_{GM}

Zur Verifizierung des atomphysikalischen Modells wird ein sprödes Material herangezogen. Ein Material versagt, wenn die äußere Beanspruchung groß genug ist, um die Bindungskräfte der Atome zu überwinden. Bei einem ideal spröden Material findet vor dem Versagensfall keinerlei plastische Verformung statt, d.h. der Festkörper bricht nahezu ohne vorherige plastische Verformung [111]. Somit kann die Kraft zur Trennung eines ideal spröden Materials als die Kraft angenommen werden, welche benötigt wird, um die Bindungskräfte zu überwinden. Im Rahmen des Versuchsaufbaus wird dem Probekörper nur eine definierte Kraft zugeführt. Somit wird angenommen, dass es sich bei genau dieser Kraft um die benötigte Kraft zur Überwindung der Bindungskräfte handelt. Für den Versuch wird ein Metalloxidplättchen als Probe herangezogen, die den beschriebenen Eigenschaften entspricht. Es handelt sich um die technische Keramik Al_2O_3 , die auch als Korund bezeichnet wird. Die Probekörper sind quaderförmig mit den Nennmaßen entsprechend Tabelle 12:

Tabelle 12: Probengeometrie der Al_2O_3 -Plättchen

Höhe	Breite	Dicke
65 mm	35 mm	0,65 mm

Der Versuchsaufbau entspricht einem 3-Punkt-Biegeversuch, wie in Abbildung 50 schematisch dargestellt. Das Metalloxidplättchen wird nach definierter Auflagefläche, mit Hilfe einer vertikal wirkenden Kraft F gebogen, bis der Versagensfall eintritt.

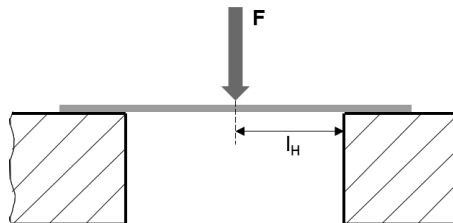


Abbildung 50: Schematischer Versuchsaufbau 3-Punkt-Biegeversuch

Zur Versuchsdurchführung wird die Universalprüfmaschine Zwick Z10/TND eingesetzt. Die Anlage besitzt eine maximale Prüfkraft von 10 kN, eine maximale Prüfgeschwindigkeit von 1800 mm/min sowie eine maximale Leistungsaufnahme von 0,8 kVa. Zur Aufnahme der anliegenden Kraft wird ein Feindehnungsmesssystem der Genauigkeitsklasse von 0,5 EN 1002-4 eingesetzt. Der Kraftmessbereich liegt zwischen 0,02 N und 500 N. Die Kraft wird über eine spindelgetriebene Traverse aufgebracht. Der maximale Traversenhub ist 919 mm bei einer Traversenwegauflösung von 0,0625 μm . Das weiße Metalloxidplättchen liegt rechts und links auf den definierten Auflageflächen auf. Werkzeug und Messsystem sind in der Ausgangsposition, wie in Abbildung 51 zu sehen, oberhalb des Prüfkörpers angeordnet. Das Messsystem erfasst während der Versuchsdurchführung die aufgebrachte Kraft F über den gefahrenen Weg s .

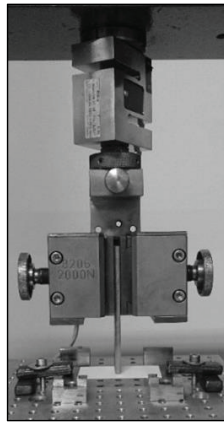


Abbildung 51: Versuchsaufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs mit dem Al_2O_3 -Prüfkörper

In Abbildung 52 ist der idealisierte Kraft-Weg-Verlauf für einen spröden Werkstoff dargestellt. Die Fläche unterhalb der Geraden entspricht der aufgewendeten Arbeit [201], also dem E_{GM} .

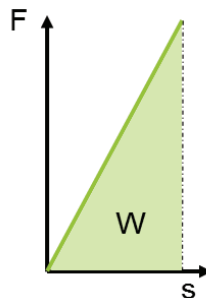


Abbildung 52: Idealisierter Kraft-Weg-Verlauf für das Biegen

Die versuchstechnisch ermittelte Biegearbeit, die Anzahl der Proben sowie die Streuungsparameter sind in Tabelle 13 dargestellt. Aufgrund der hinreichend kleinen Streuung ist eine repräsentative statistische Aussagekraft gewährleistet.

Tabelle 13: Versuchsergebnis 3-Punkt-Biegeversuch

Anzahl der Proben	Biegearbeit W_b	Standardabweichung ³⁰	Varianz ³¹
14	0,00803755 J	$4,9514 \cdot 10^{-4}$	$2,2766 \cdot 10^{-7}$

Auf Basis der Versuchsauswertung ergibt sich für die **messtechnisch ermittelte Biegearbeit W_b ein Wert von 0,00803755 J.**

Um den Zusammenhang zum E_{SM} anschaulich darstellen zu können, wird auf Basis der versuchstechnisch ermittelten Biegearbeit die Biegefestigkeit bestimmt:

Die Gleichung 24: $W = \frac{\sigma_b \cdot I_{yy}}{l_H} \cdot s$, zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs für die Grundoperation des Biegens wird nach der Biegefestigkeit σ_b aufgelöst. Die gemessenen Werte des Versuchsaufbaus (siehe Tabelle 14) werden entsprechend eingesetzt. Für die Biegefestigkeit σ_b ergibt sich somit ein Wert von 571 N/mm^2 .

Tabelle 14: Werte zur Berechnung der versuchsmäßigen Biegefestigkeit

Größe	Wert
Biegearbeit	$W = 0,00803755 \text{ J}$
Flächenträgheitsmoment	$I_{yy} = 1232,29 \text{ mm}^4$
Randfaserabstand	$z = 0,65 \text{ mm}$
Hebelarm	$l_H = 45 \text{ mm}$
Weg	$s = 0,614 \text{ mm}$

9.1.2 Berechnung des E_{GM} als festgelegte Bestimmung für die Grundoperation Biegen

Die Versuchsergebnisse werden mit den rechnerisch ermittelten Größen, entsprechend der Systematik zur Ermittlung des Mindestenergiebedarfs, verglichen. Die im Werkstoffdatenblatt angegebene Biegefestigkeit beträgt 400 N/mm^2 [170].

Die Biegefestigkeit entspricht ebenfalls den Werten aus Standard-Tabellenwerken [195].

Um den E_{GM} für den im Versuch beschriebenen Vorgang rechnerisch zu ermitteln, wird die Grundoperation „Biegen“ herangezogen.

³⁰ Die Standardabweichung beschreibt den Mittelwert der Abweichung. Die Standardabweichung wird normativ in der Einheit des Messwertes angegeben. [108]

³¹ Die Varianz ist die mittlere quadratische Abweichung der Messwerte von ihrem Mittelwert. [108]

Dazu wird die Gleichung 24 angesetzt, die werkstoffspezifischen Werte aus Tabelle 15 eingesetzt und die erforderliche Arbeit, also der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf, ermittelt.

Tabelle 15: Werte zur Berechnung des E_{GM} für den Al_2O_3 -Prüfkörper

Größe	Wert
kritische Biegespannung	$\sigma_b = 400 \text{ N/mm}^2$
Flächenträgheitsmoment	$I_{yy} = 1232,29 \text{ mm}^4$
Randfaserabstand	$z = 0,65 \text{ mm}$
Hebelarm	$l_H = 45 \text{ mm}$
Weg	$s = 0,65 \text{ mm}$

Aufgrund des nahezu ideal spröden Verhaltens des Metalloxids wird zur idealen Vorgangsbeschreibung davon ausgegangen, dass keine Durchbiegung stattfindet. Deshalb wird als Biegeweg die Probendicke angesetzt. Auf Basis dieser Werte und Gleichung 24 **errechnet sich für den E_{GM} ein Wert von 0,00711991 J**. Die Differenz zwischen der gemessenen Biegearbeit und dem berechneten E_{GM} werden in Kapitel 9.1.4 erörtert.

9.1.3 Theoretische Bestimmung des E_{SM} auf atomarer Ebene für das atomphysikalische Modell

Im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Betrachtungen zur Bestimmung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs, wird im Folgenden der mikroskopisch erforderliche Mindestsystemenergieänderungsbedarf E_{SM} bestimmt. Zur Ermittlung der theoretischen Biegefestigkeit wird der E_{SM} auf Basis von Literaturwerten aus der Atomphysik berechnet.

Um mikroskopisch das zu trennende Volumen zu bestimmen, wird vorab auf die Gitterstruktur der Probe eingegangen. Bei dem betrachteten Probenwerkstoff handelt es sich um ein Metalloxid, genauer um ein Oxid mit einer O_3 -Verbindung, auch Korund genannt. Der Werkstoff Al_2O_3 kristallisiert trigonal [217]. In der Gitterstruktur bilden die Sauerstoffatome eine leicht verzerrte, hexagonale Kugelpackung. Hierbei werden, wie in Abbildung 53 dargestellt, zwei Drittel der Oktaederlücken mit Aluminiumatomen besetzt [185]. Es handelt sich in Realität um eine dreidimensionale Anordnung der Atome. Zwischen zwei benachbarten Aluminiumatomen befindet sich im Raum immer mindestens ein Sauerstoffatom. Im Gleichgewichtszustand sind die Atome im Gitter so angeordnet, dass sich die anziehenden, auch Coulombkräfte genannt, und die abstoßenden Kräfte kompensieren [239]. Zwei benachbarte Aluminiumatome können aufgrund der Anordnung und des Gleichgewichtszustandes keinen geringeren Abstand im Gitter einnehmen, als den, der durch den Durchmesser eines Sauerstoffatoms determiniert ist. Der Durchmesser des Sauerstoffatoms beinhaltet auch die Strecke der

Atombindung. Die Strecke der Atombindung als solches ist in Abbildung 53 schematisch als Verbindungslinie dargestellt.

Zur Ermittlung des E_{SM} für das Trennen wird das aufgebrochene Volumen bestimmt. Das Trennvolumen lässt sich durch Breite und Dicke der Probe (aus Tabelle 12) sowie dem Durchmesser eines Sauerstoffatoms bestimmen. Der Durchmesser des Sauerstoffatoms ist der Abstand, der zwischen den beiden zu trennenden Teilen mindestens eingestellt werden muss, um eine vollständige Trennung umzusetzen. Aus der Gitterstruktur nach Abbildung 53 ist der Mindestabstand d_o nachvollziehbar zu erkennen.

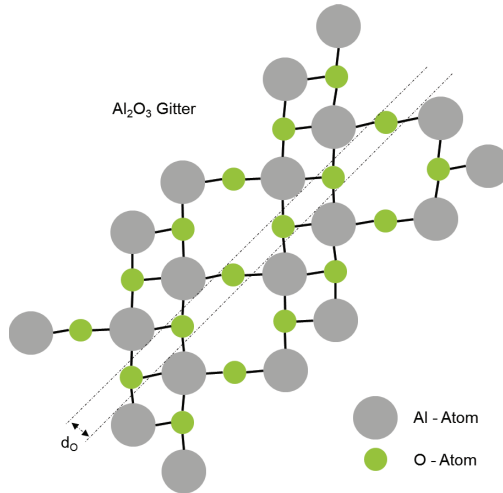


Abbildung 53: Al_2O_3 -Gitter nach [217] [185]

Somit gilt für die erforderliche Arbeit W , um den E_{SM} aufzubringen nach [191] und [74], unter Einbezug des aufzubrechenden Volumens, auf mikroskopischer Ebene:

$$W = \Delta H \cdot M \cdot \rho \cdot V = \Delta H \cdot M \cdot \rho \cdot b \cdot d \cdot d_o$$

Gleichung 45

mit	ΔH	Bindungsenthalpie
	M	Molare Masse
	ρ	Dichte
	b	Breite
	d	Dicke
	d_o	Durchmesser Sauerstoffatom

Die mikroskopischen Werte zur Berechnung der erforderlichen Arbeit nach Gleichung 45 werden entsprechend Tabelle 16 eingesetzt:

Tabelle 16: Werte zur Berechnung des E_{SM}

Größe	Wert	Datenquelle
Bildungsenthalpie	$H = 1677000 \text{ J/mol}$	[91]
Molare Masse	$M = 101,96 \text{ g/mol}$	[91]
technische Dichte	$\rho = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$	[170]
Durchmesser Sauerstoffatom	$d_o = 4,8 \cdot 10^{-8} \text{ mm}$	[180]

Somit ergibt sich für die Gittertrennung eine zu verrichtende Arbeit für die Probe, also der **Mindestsystemenergieänderungsbedarf E_{SM} von 0,69085555 J**.

Auf dieser Basis wird analog die Biegefestigkeit zur Verifikation bestimmt.

Tabelle 17: Werte zur Berechnung der Biegefestigkeit mit Hilfe des E_{SM}

Größe	Wert
Biegearbeit	$W = 0,69085555 \text{ J}$
Flächenträgheitsmoment	$I_{yy} = 1232,29 \text{ mm}^4$
Randfaserabstand	$z = 0,65 \text{ mm}$
Hebelarm	$l_H = 45 \text{ mm}$
Weg	$s = 0,65 \text{ mm}$

Gemäß Gleichung 24 und den Werten aus Tabelle 17 ergibt sich für die Biegefestigkeit σ_b ein Wert von **40.910 N/mm²**.

9.1.4 Gegenüberstellung der mikroskopischen und makroskopischen Ergebnisse zur Verifizierung des Mindestenergiebedarfs

Im Folgenden werden die Ergebnisse gegenübergestellt und diskutiert. Abbildung 54 zeigt die Versuchsergebnisse: die im Biegeversuch ermittelte Biegearbeit, den mittels der Mindestenergiebedarfsmethode berechneten E_{GM} sowie den theoretisch auf Basis mikroskopischer Gesetzmäßigkeiten bestimmten E_{SM} im Vergleich. Dargestellt sind der Wert für den E-Modul, die Bruchfestigkeit sowie die Gegenüberstellung der Werte für den Energiebedarf.

Der E-Modul ist für die drei Betrachtungen dem Werkstoffdatenblatt entnommen. Der angegebene E-Modul für die Probe beträgt $3,9 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ [170]. Basierend auf den in Abschnitt 5 erörterten Werkstoffzusammenhängen ist der E-Modul für alle Betrachtungen, im Rahmen dieser Verifizierung identisch. Sowohl mikroskopisch, als auch makroskopisch betrachtet, hat der E-Modul den gleichen Wert und gilt als konstant

[78]. Die Bruchfestigkeit ist versuchstechnisch ermittelt bzw. dem Werkstoffdatenblatt entnommen.

Makroskopisch gemessen	Makroskopisch berechnet	Mikroskopisch ermittelt
Versuchstechnisch ermittelte Biegearbeit W_b	Grundoperations-spezifischer Mindestenergiebedarf E_{GM}	Mindest-systemenergie-änderungsbedarf E_{SM}
Aufgenommene Versuchswerte	Werkstoffkennwerte aus Tabellenwerk	Atomare Kennwerte aus Literatur
E-Modul Al_2O_3: $3,9 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$	E-Modul Al_2O_3: $3,9 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$	E-Modul Al_2O_3: $3,9 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$
Bruchfestigkeit σ_b: 476 N/mm^2	Bruchfestigkeit σ_b: 400 N/mm^2	Bruchfestigkeit σ_b: 40.910 N/mm^2
$> 1,19 \times$	$\times 102 <$	
W_b: $0,0080 \text{ J}$	E_{GM}: $0,0071 \text{ J}$	E_{SM}: $0,6909 \text{ J}$
$> 1,13 \times$	$\times 97 <$	

Abbildung 54: Gegenüberstellung der Verifikationsversuche

Die Abweichung der gemessenen Biegearbeit W_b zum errechneten Mindestenergiebedarf E_{GM} liegt bei 13 %. Auf Basis der gemessenen Biegearbeit wird die tatsächliche Bruchfestigkeit errechnet. Die Abweichung der Bruchfestigkeit aus dem Werkstoffdatenblatt zu der atomar bestimmten Bruchfestigkeit, rührt daher, dass auf mikroskopischer Ebene Gitterdefekte nicht berücksichtigt werden. Auch wenn es sich bei der vorliegenden Probe um einen sehr reinen und hoch verdichteten Werkstoff handelt, liegen Gitterdefekte vor. Diese Gitterdefekte verringern im realen Werkstoff die Festigkeit, da diese Fehlstellen zu Spannungsüberhöhungen im Gefüge führen [239]. Die Abweichung zwischen der mikroskopisch geltenden und der makroskopisch empirisch ermittelten Bruchfestigkeit liegt in dem beschriebenen Abweichungsbereich aus Kapitel 5.2.4 von 1/100 bis 1/10.000. Die Abweichung von 76 N/mm^2 zwischen der versuchstechnisch ermittelten Bruchfestigkeit und der Bruchfestigkeit aus dem Werkstoffdatenblatt beruht darauf, dass unter realen Gegebenheiten der Versuchsdurchführung nicht alle Fehlereinflussfaktoren vollständig eliminiert werden können.

Der Vergleich mit den folgenden Versuchen zeigt, dass es sich hier um systematische Fehler in der Messung handelt. Systematische Fehler beschreiben Abweichungen, die bei gleichem Versuchsaufbau in der gleichen Höhe reproduzierbar auftreten. Entlang der Messkette dieses Versuchsaufbaus gehören hierzu die systematischen Abweichungen in Folge der Einflüsse durch die Probenaufnahme, dem Biegewerkzeug, dem Kraftsensor, dem Antrieb und Aufbau des Prüfgeräts und der Längenmesseinrichtung. Zu diesen Fehlern zählt die Abnutzung des Werkzeugs. So sind die verwendeten

Spannbacken zum Spannen des Stempels bereits abgenutzt und es kommt zum Abgleiten des Stempels innerhalb der Spannbacken. Auch die Kraftmessdose sowie die dazugehörige Übertragung zum Messrechner und die Auswertung sind nicht frei von systematischen Fehlern, in Folge der Toleranz der eingangs beschriebenen Messgenauigkeit. Des Weiteren müssen Elastizitäten in der Werkzeugaufnahme berücksichtigt werden. Außerdem steigt mit wachsender Abnutzung der Spindel der Steigungsfehler, insbesondere bei einem vielfach eingesetzten Prüfgerät. Zudem kommt die Messungenauigkeit in Form des Teilungsfehlers der Längenmesseinrichtung zur Aufnahme des Weges. Ferner ist zu ergänzen, dass die Biegearbeit durch die Messung des Kraft- und Wegverlaufs ermittelt wurde. Die Biegespannung für den Biegeversuch wurde aus den erfassten Kraft-Weg Verläufen ermittelt. Der Einfluss durch die Interpolation der Daten ist ebenfalls als Abweichung zum Soll-Wert zu berücksichtigen. Zum anderen verkörpern Werkstoffdatenangaben von Herstellern und Standardtabellenwerken jeweils den untersten Toleranzwert, im Sinne einer Größe, die mindestens standgehalten wird oder überwunden werden muss.

Durch die Gegenüberstellung wird festgestellt, dass der berechnete grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf E_{GM} , wie im Rahmen dieser Arbeit beschrieben, der niedrigste Wert ist. Der E_{GM} wird weder auf mikroskopischer Ebene, noch durch einen makroskopischen Versuchsaufbau unterboten. Der E_{SM} ist höher, aufgrund von nicht berücksichtigten Gitterdefekten. Die versuchstechnisch ermittelte Biegearbeit ist höher, da nicht alle auftretenden Fehlereinflussgrößen bei der Versuchsdurchführung eliminiert werden können. Damit ist der durch das beschriebene Vorgehen zur Ermittlung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs berechnete E_{GM} , der mindestens erforderliche Energiebedarf für eine makroskopische Transformation eines realen Werkstoffs und kann damit als Referenzwert für die Berechnung der REE herangezogen werden. Die Richtigkeit der Berechnung gilt unter idealen makroskopischen Bedingungen, wie am Versuchsaufbau für das Trennen mittels der Grundoperation Biegen an der konkreten Probe gezeigt.

9.1.5 Übertragung der Verifikationssystematik auf die weiteren Modellvorstellungen zur Mindestenergiebedarfsbestimmung

Zur theoretischen Verifizierung der werkstoffwissenschaftlichen, thermodynamischen und chemischen Modellvorstellung des Mindestenergiebedarfs, wird die Gültigkeit der versuchstechnisch bestätigten Zusammenhänge aus dem vorangegangenen Abschnitt zwischen E_{GM} und E_{SM} für diese dargelegt.

Die in dem vorangegangenen Versuch angewandte Systematik wird im Folgenden auf die drei genannten Modellvorstellungen zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs übertragen.

Die Systematik ist charakterisiert durch die funktionale Abhängigkeit und die messtechnische Bestimmbarkeit einer spezifischen Arbeitsform sowie spezifischer Werkstoffkennwerte. Die Verfügbarkeit empirisch ermittelter Werkstoffkennwerte, als Vergleichsbasis wird als gegeben angenommen. Folgen die Modellvorstellungen derselben Systematik, lässt sich eine theoretische Verifizierung analog durchführen.

Eine explizite Verifizierung des werkstoffwissenschaftlichen, des thermodynamischen und des chemischen Modells zur Mindestenergiebedarfsbestimmung wird an dieser Stelle nicht durchgeführt. Jedoch wird die Rückführbarkeit der funktionalen Abhängigkeiten auf den vorher beschriebenen Versuch dargestellt. Dadurch gelten auch diese drei Modelle als verifizierbar.

Werkstoffwissenschaftliches Modell

Analog zur atomphysikalischen Modellvorstellung gilt für das werkstoffwissenschaftliche Modell der Zusammenhang von Kraft F und Weg s . Die Fläche unterhalb des Kraft-Weg-Verlaufs entspricht der zu leistenden Arbeit [201]. Dargestellt sind der Zusammenhang und die daraus resultierende Arbeit W für eine plastische Verformung in Abbildung 55:

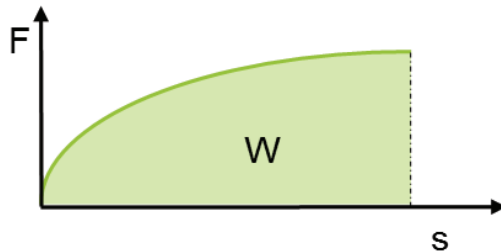


Abbildung 55: Kraft-Weg-Verlauf für eine plastische Verformung

Der abgebildete idealisierte Kraft-Weg-Verlauf spiegelt ein ideal duktils Verhalten wieder. Der Werkstoff verformt sich bei einer Belastung oberhalb der Streckgrenze plastisch. Dieser plastische Anteil der Verformung ist irreversibel [111].

Die eingebrachte Arbeit fließt somit unter idealen Umständen direkt in die plastische Verformung einer Probe. Die Größen, die die erforderliche Arbeit determinieren, sind lediglich abhängig vom eingesetzten Werkstoff sowie der Probengeometrie. Diese reine Abhängigkeit von Werkstoff und Geometrie entspricht dem Verhalten des vorweg analysierten Biegeversuchs. Die Messgrößen, aus denen der E_{GM} bestimmt wird, stehen im gleichen Zusammenhang. Aus diesem Verlauf lässt sich die erforderliche Arbeit als Fläche unterhalb der Kurve bestimmen.

Das werkstoffwissenschaftliche Modell gilt somit als theoretisch verifizierbar, wenn sich die Arbeit W , ermittelt aus Kraft und Weg, in einem Versuchsaufbau unabhängig von maschinenspezifischen Einflüssen erfassen lässt (*analog der Verifizierung des atomphysikalischen Modells*).

Thermodynamisches Modell

Für das thermodynamische Modell gilt der Zusammenhang nach

Gleichung 12: $Q = c \cdot m \cdot (T_1 - T_0)$.

Der Temperaturverlauf zur Ermittlung der erforderlichen thermischen Arbeit Q ist in Abbildung 56 dargestellt. Das Produkt aus spezifischer Wärmekapazität c und der Bauteilmasse m ist dabei konstant.

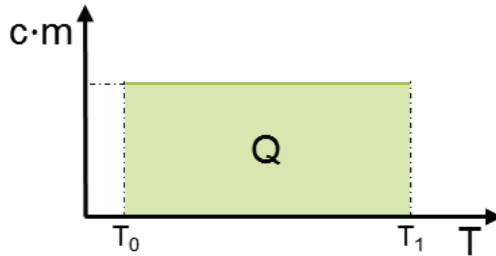


Abbildung 56: Temperatur-Verlauf

Bei diesem Modell lässt sich die notwendige Arbeit analog über die Fläche unterhalb des Temperaturverlaufs bestimmen. Dieser Verlauf setzt sich aus dem Produkt von spezifischer Wärmekapazität und der Bauteilmasse sowie dem Temperaturunterschied zusammen. Diese Größen sind, wie bei den Modellen zuvor, nur abhängig vom Werkstoff und der Probengeometrie.

Das thermodynamische Modell gilt somit als theoretisch verifizierbar, wenn die thermische Arbeit Q in einem Versuchsaufbau unabhängig von maschinenspezifischen Einflüssen erfasst werden kann (*analog dem atomphysikalischen und werkstoffwissenschaftlichen Modell*).

Chemisches Modell

Entsprechend der chemischen Modellvorstellung des Mindestenergiebedarfs ist die Ermittlung des mikroskopischen E_{SM} und des makroskopischen E_{GM} identisch.

Auf beiden Betrachtungsebenen entspricht die sog. Aktivierungsenergie dem Mindestenergiebedarf.

Sie kann, wie in der Literatur bereits belegt, unmittelbar über die Arrhenius Gleichung bestimmt werden [163].

9.2 Experimentelle Darstellung der Mindestenergiebedarfsberechnung und REE-Ermittlung am Beispiel der GOP Biegen

Zur experimentellen Darstellung der Mindestenergiebedarfsberechnung werden in den folgenden Abschnitten verschiedene Fertigungsverfahren, denen die Grundoperation Biegen zugrunde liegt, herangezogen. Verwendet wird hierzu jeweils ein duktiler Kupferwerkstoff. Dieser Werkstoff wird jeweils durch ein bestimmtes Fertigungsverfahren der Hauptgruppe Umformen und der Hauptgruppe Fügen der DIN 8580 verarbeitet. Gezeigt wird die Berechenbarkeit des Mindestenergiebedarfs sowie die Ermittlung der *REE* anhand des gemessenen Energieverbrauchs.

9.2.1 Messtechnik zur Erfassung der Energieverbräuche zur Ermittlung der Relativen Energieeffizienz auf Prozessebene

Die Erfassung des tatsächlichen Energieverbrauchs zur Ermittlung der *REE* erfolgt mit einem Energiemesskoffer, der zwischen Anlage und Energiequelle geschaltet wird, Abbildung 57 zeigt den verwendeten Messkoffer. Die Erfassung der elektrischen Größen zur Bestimmung des Energieverbrauchs erfolgt durch das Messgerät SENTRON PAC 4200 der Firma SIEMENS, dem Herzstück des Messkoffers. Das Messgerät erfüllt die funktionsbezogenen Genauigkeitsklassen gemäß IEC 61557-12, bei einer Abweichung von 0,2% bezogen auf den Messwert. Der Messbereich liegt zwischen 0,5 A – 50 A pro Phase, zwischen 0 V - 400 V [211]. Zur Aufzeichnung und Speicherung der Messergebnisse wird das Messgerät über eine LAN-Schnittstelle mit einem externen Rechner verbunden und der integrierte Mess-PC gesteuert [213].

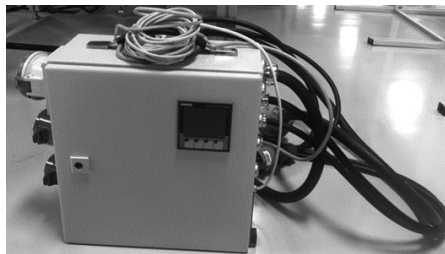


Abbildung 57: Energiemesskoffer

Bei der Messung ist zu beachten, dass sowohl die zu messenden Größen, als auch die Länge des Erfassungsintervalls vorher festgelegt werden. Für nachfolgenden Versuchsreihen wurden die Momentanwerte von Wirk-, Blind- und Scheinleistung sowie die Stromstärke in einem voreingestellten Intervall von 100 ms erfasst. Im ersten Schritt wird die Messzeitdifferenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messzeitpunkten ermittelt. Im zweiten Schritt wird der momentane Energieverbrauch je Messzeitpunkt durch Multiplikation des Messzeitintervalls mit dem gemessenen Momentanwert der Wirkleistung berechnet. Der Gesamtenergieverbrauch ergibt sich somit durch Aufsummierung der intervallbezogenen Energieverbräuche.

9.2.2 DIN 8580 2.4.1 Biegeumformen mit geradliniger Werkzeugbewegung

Das Fertigungsverfahren des Biegeumformens mit geradliniger Werkzeugbewegung, aus der Hauptgruppe Umformen der DIN 8580, wird stellvertretend für Verfahren mit der Grundoperation Biegen betrachtet. Der Versuchsaufbau entspricht dem Aufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs entsprechend des Korundversuchs aus Kapitel 10.1.

Die bereits zuvor beschriebene Universalprüfmaschine Zwick Z010/TND wird auch hierfür eingesetzt. Die einzige Änderung besteht darin, dass für die Durchbiegung f ein maximaler Weg von 10 mm eingestellt wird. Dadurch verfährt der Stempel der Prüfmaschine in Richtung der Biegekraft um genau 10mm. Nach diesem Verfahrensweg stoppt der Stempel. Es kommt dadurch zu keinem Versagen des Materials in Form eines Biegebruchs, wie bei der Versuchsreihe für die Korund-Probe. Bei diesem Versuch, zur Darstellung des Mindestenergiebedarfs für das Biegeumformen, wird eine duktile Kupferprobe eingesetzt. Der schematische Aufbau des 3-Punkt-Biege-Versuchs für die Kupferprobe entspricht dem Versuchsaufbau aus Kapitel 10.1. für die Korund-Probe, wie in Abbildung 50 bereits dargestellt. Die folgende Abbildung zeigt den Versuchsaufbau für den 3-Punkt-Biegeversuch mit der Kupfer-Probe:

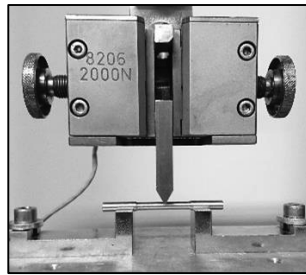


Abbildung 58: Versuchsaufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs mit der Kupfer-Probe

Für die Versuche werden Zugproben nach DIN 50125 verwendet. Im Speziellen handelt es sich um die Zugproben Form A [45]. Die Abmessungen können der folgenden Abbildung 59 entnommen werden. Bei dem verwendeten Material handelt es sich um den Werkstoff CuZn10. Die relevanten Kennwerte für diesen Werkstoff sind die Zugfestigkeit $R_m = 340 \text{ N/mm}^2$, der E-Modul $E = 124.000 \text{ N/mm}^2$ sowie die maximale Bruchdehnung von $A = 25 \%$ [241].

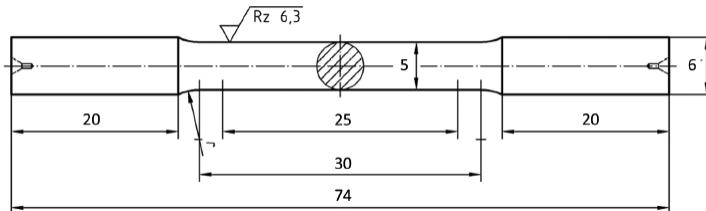


Abbildung 59: Fertigungszeichnung CuZn10-Zugprobe [45]

Berechnung des E_{GM} für die Grundoperation Biegen

Das Fertigungsverfahren und die Grundoperation sind bekannt. Das Fertigungsverfahren ist definiert durch das sogenannte Biegeumformen mit geradliniger Werkzeugbewegung der Hauptgruppe Umformen der DIN 8580. Diese Fertigungsverfahren liegt die Grundoperation Biegen (GOP₄) zugrunde. Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf lässt sich ermitteln

durch die Gleichung 24: $W = \frac{\sigma_b \frac{I_{yy}}{z}}{l_H} \cdot s$

Der Änderungsbedarf ist der zurückzulegende Weg s . Der zurückzulegende Weg s ist definiert durch den definierten Biegeweg f von 10mm, wie vorher beschrieben. Die Werkstoffkennwerte für den Probekörper aus CuZn10 sind bekannt. Die entsprechenden geometrieabhängigen Größen sind durch die Zeichnung der CuZn10-Zugprobe und dem beschriebenen Aufbau des Versuchs definiert.

Tabelle 18: Werte zur Berechnung des E_{GM} für die CuZn10-Probe

Größe	Wert
kritische Biegespannung	$\sigma_b = 408 \text{ N/mm}^2$
Flächenträgheitsmoment	$I_{yy} = 30,679 \text{ mm}^4$
Randfaserabstand	$z = 2,5 \text{ mm}$
Hebelarm	$l_H = 36 \text{ mm}$
Weg	$s = 10 \text{ mm}$

Auf Basis dieser Werte und Gleichung 24 **ergibt sich für das Biegeumformen mit geradliniger Werkzeugbewegung der CuZn10-Probe ein $E_{GM, Prozess}$ von 5,56 J.**

Messtechnische Erfassung der Biegearbeit als Versuchsreferenz

Entsprechend dem vorher beschriebenen Versuchsdurchführung für die Korund-Probe wird auch für die CuZn10-Probe die Biegearbeit durch die Universalprüfmaschine Zwick Z010/TND aufgezeichnet. Der Aufbau und die Prüfenauigkeit sind entsprechend wie unter Kapitel 9.1 beschrieben. Zur Ermittlung der geleisteten Biegearbeit erfasst das Messsystem während der Versuchsdurchführung die aufgebrachte Kraft F über den gefahrenen Weg s .

Für die spätere Ermittlung der *Relativen Energieeffizienz (REE)* ist die Erfassung der Biegearbeit nicht erforderlich. Die Erfassung der Biegearbeit soll an dieser Stelle nur noch einmal als Referenz für die Validität des berechneten E_{GM} dienen.

Auf Basis der aufgezeichneten Werte für Kraft und Weg während der Versuchsdurchführung **ergibt sich für das Biegeumformen mit geradliniger Werkzeugbewegung der CuZn10-Probe eine tatsächlich eingebrachte Biegearbeit W_b von 6,22 J.**

Energieverbrauchserfassung an der Universalprüfmaschine Zwick 2010/TND

Die Erfassung des Energieverbrauchs für die Durchführung des Umformprozesses in Form der Größe $E_{C,Prozess}$ erfolgt mit Hilfe des unter Kapitel 9.2.1 beschriebenen Messkoffers.

Hierzu wird der tatsächliche Endenergieverbrauch in Form von elektrischem Strom erfasst. Für die prozessspezifische Energieeffizienzbewertung des reinen Biegevorgangs wird hierzu die eingesetzte elektrische Energie in Form des E_{CM} für die Dauer der Ausführung von einem Biegevorgang, an der Universalprüfmaschine erfasst. Andere Energieträger und Betriebsstoffe sind für die Prozessdurchführung auf der Universalprüfmaschine sind nicht erforderlich. Der Endenergiebedarf für den Einsatz von Betriebsstoffen E_{CB} ist in diesem Fall Null. Der Endenergieverbrauch für das parallel laufende Messsystem zur Aufzeichnung der Biegearbeit wird nicht berücksichtigt. Das Messsystem ist kein Bestandteil der Maschine, bzw. Betriebsmittel zur Ausführung des Biegeprozesses.

Die Erfassung des Energieverbrauchs erfolgt, durch das Messgerät SENTRON PAC 4200 im Messkoffer, wie bereits beschrieben. Die Erfassung erfolgt rechnergestützt durch die Aufzeichnung der einzelnen Messwerte der Wirkleistung P_{wi} für jedes Zeitintervall. Ein Zeitintervall t_i beträgt wie oben beschrieben 100ms. Die einzelnen Messwerte P_{wi} werden dem zugehörigen Zeitintervall t_i multipliziert und anschließend über den Zeitraum der Prozessdurchführung des Biegens aufsummiert.

Die Dauer für die Durchführung eines Biegevorgangs der CuZn10-Probe beträgt 30 Sekunden. Daraus ergibt sich ein Endenergieverbrauch $E_{C,Prozess}$ zur Durchführung des Biegeprozesses von 158 J.

Ermittlung der REE für das Biegeumformen der CuZn10-Probe

Auf Basis der Werte von $E_{C,Prozess}$ und $E_{GM,Prozess}$ lässt sich gemäß Gleichung 46:

$$REE_{Prozess} = \left(1 - \frac{(E_{C,Prozess} - E_{GM,Prozess})}{E_{C,Prozess}} \right) \cdot 100\%$$

die Relative Energieeffizienz somit für den Prozess **Biegeumformen mit geradliniger Werkzeugbewegung beziffern mit einem Wert $REE_{Prozess}$ von 3,5%.**

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse dieses Versuchsaufbaus kurz zusammengefasst:

Tabelle 19: Ergebnisse CuZn10

W_b	$E_{GM,Prozess}$	$E_{C,Prozess}$	$REE_{Prozess}$
6,22 J	5,56 J	158 J	3,5 %

Die Abweichung der über das Messsystem der Universalprüfmaschine Zwick ermittelten Biegearbeit W_b zu dem berechneten E_{GM} liegt bei 12%. Dieses Verhältnis entspricht der gleichen Größenordnung wie bei dem vorangegangenen Korundversuch

(vgl. Abbildung 54: $W_b = 0,0080 \text{ J}$; $E_{GM} = 0,0071 \text{ J}$; Abweichung = 13 %). Nachdem es sich bei der vermeintlichen Prozessmaschine um eine Universalprüfmaschine handelt, die nicht für den Zweck der Produktion ausgelegt ist, muss von relativ geringen Energieeffizienzwerten ausgegangen werden. Dies bestätigt sich durch das Ergebnis der *REE*. Zudem ist die Universalprüfmaschine für eine Prüfkraft für bis zu 10 kN ausgelegt. Dementsprechend sind die zu verfahrensden Maschinenbestandteile von großer Masse, zur Gewährleistung der Steifigkeit für Messaufgaben, geprägt. Dieses Massenverhältnis zwischen Anlage und Prüfkörper spiegelt sich in der *REE* wider.

9.2.3 DIN 8580 4.5.1 Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper

Der Mindestenergiebedarf des Fertigungsverfahrens Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper (aus der Hauptgruppe Fügen der DIN 8580) lässt sich ebenfalls durch die Grundoperation Biegen beschreiben.

Nach DIN 8593 ist das Wickeln mit Draht als Fügen eines Innenteils mit einem Draht durch dessen fortlaufendes Biegen um das Innenteil definiert. Für die experimentelle Darstellung zur Ermittlung der Relativen Energieeffizienz für einen Fügevorgang wird hierzu das Wickeln von Kupferdraht zu einer Spule untersucht. Dieses Fertigungsverfahren wird insbesondere zur Spulenherstellung für elektrische Maschinen eingesetzt.

Die Form des Werkstücks, in diesem Fall die Form des Drahtes, wird während des Wickelprozesses geändert und der Zusammenhalt des Werkstoffes durch das Bewickeln eines Wickelkörpers vergrößert [48]. Je nach Anforderung stehen verschiedene Wickelverfahren zur Herstellung der Spulen zur Verfügung, die sich in der Art ihrer Aufwickel- und Vorschubbewegung unterscheiden. Grundsätzlich lassen sich diese in Rotations- und Hub-Schwenk-Wickelverfahren einteilen. Folgend wird die Mindestenergiebedarfsberechnung exemplarisch für das Linear-/Schablonenwickeln, ein Wickelverfahren des Rotationswickelns, beschrieben [58]. Mithilfe des Linearwickelns ist es möglich, rotationssymmetrische Wickelkörper zu bewickeln [73]. Der zu bewickelnde Körper ist dabei auf einer rotierenden Spindel befestigt. Der Drahtführer beziehungsweise Drahtverleger führt gleichzeitig die translatorische Bewegung aus, sodass sich eine wendel- oder schraubenförmige Reihung der Windungen in axialer Richtung der Spule ergibt [222]. Durch die Rotationsbewegung der Wickelspindel wird der Draht aus der Bevorratung abgezogen und der Spulenkörper damit bewickelt. Eine Drahtbremse hält dabei die Drahtzugkraft auf einem konstanten Niveau und sorgt somit für ein gleichmäßiges Wickelergebnis [164]. Beim Schablonenwickeln werden rotationssymmetrische Schablonen bewickelt.

Im Rahmen des folgenden Versuchs wird hierzu die Herstellung einer Kupferspule mit der Einspindelwickelmaschine des Herstellers Risomat, wie in Abbildung 60 gezeigt, näher betrachtet. Hierbei handelt es sich um einen Linear-/Schablonenwickler mit umlaufender Schablone. Die Versuchsanlage wickelt Spulen in einem Durchgang.

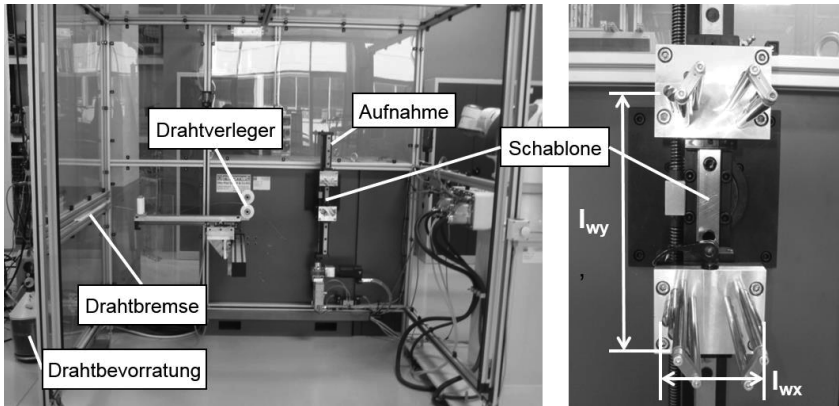


Abbildung 60: Risomat Spulenwickler mit Wickelschablone

Berechnung des E_{GM} für die Grundoperation Biegen

Das Fertigungsverfahren und die Grundoperation sind bekannt. Das Fertigungsverfahren ist definiert durch das sogenannte Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper. Diesem Fertigungsverfahren liegt die Grundoperation Biegen (GOP₄) zugrunde. Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf lässt sich ermitteln

durch die Gleichung 24: $W = \frac{\sigma_p \frac{l_{yy}}{z}}{l_H} \cdot s$

Der Änderungsbedarf ist der zurückzulegende Weg s . Der zurückzulegende Weg ist definiert durch den Biegeweg. Der Biegeweg entspricht der Biegelänge l_w auf welche die Biegekraft wirkt. Die Biegelänge hängt von der Geometrie der zu bewickelnden Spule ab. Die Biegelänge entspricht der Kantenlänge des zu bewickelnden Spulenkörpers. Somit ergibt sich die Biegelänge für eine Windung der Spule aus der Summe der einzelnen Kantenlängen um die einmal gebogen wird, wie in Abbildung 61 dargestellt ist. Soll beispielsweise ein rechteckiger Querschnitt bewickelt werden, ergibt sich die Biegelänge aus der Länge l_{wx} bzw. l_{wy} , wie ebenfalls in Abbildung 61 zu erkennen ist.

Die gesamte Spule besteht aus mehreren Windungen. Die gesamte Biegelänge s lässt sich bestimmen durch die Biegelänge für eine Windung multipliziert mit der Anzahl x der Windungen der gesamten Wicklung. Dies gilt ebenso für einen runden Querschnitt. Hier ist jedoch die Biegelänge dementsprechend dem Umfang gleichzusetzen [34].

Der Hebelarm l_H entspricht der Dicke des Drahts. In der Vergrößerung Z der nachfolgenden Abbildung ist der Zusammenhang zwischen der Drahtdicke und dem Hebelarm veranschaulicht. Die gestrichelten Bereiche stellen den bereits gebogenen Zustand dar. Dies gilt sowohl im Falle eines runden Querschnitts als auch im Falle eines Rechtecks. In der folgenden Abbildung ist der Biegeweg und der Hebelarm veranschaulicht dargestellt:

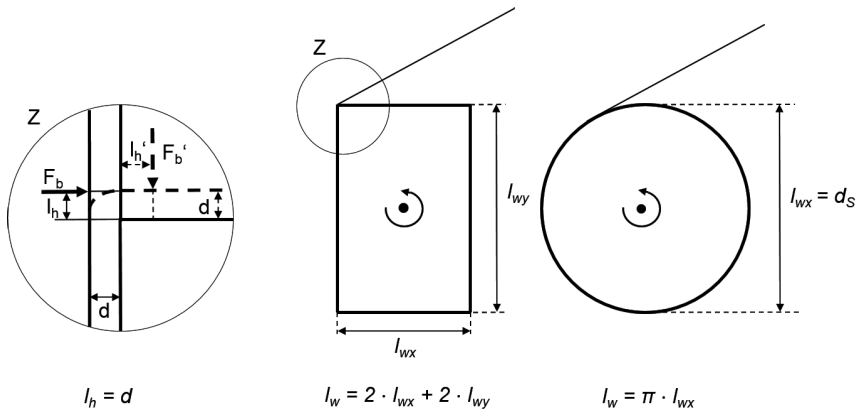


Abbildung 61: Unterscheidung der Wickelkörper zur Bestimmung der Biegelänge

Die Werkstoffkennwerte für den 1 mm dicken Runddraht aus CuZn10 sind bekannt. Die Versuchsspule hat eine Windungszahl von 90. Die entsprechenden geometrieabhängigen Größen sind durch die Wickelschablone und dem beschriebenen Aufbau des Versuchs definiert. Die Wickelkörpergeometrie ist eine rechteckige Spule mit den Seitenlängen 100 mm und 180 mm. Die Biegelänge beträgt somit 50,4 m. Die Werte für das Flächenträgheitsmoment und den Randfaserabstand ergeben sich aus der Geometrie des Drahts. In der folgenden Tabelle sind die erforderlichen Werte zur Berechnung des grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfs für das Umformen drahtförmiger Körper, am Beispiel des Schablonenwickelns im Überblick dargestellt:

Tabelle 20: Werte zur Berechnung des E_{GM} für die CuZn10-Probe

Größe	Wert
kritische Biegespannung ³²	$\sigma_b = 408 \text{ N/mm}^2$
Flächenträgheitsmoment	$I_{yy} = 0,049 \text{ mm}^4$
Randfaserabstand	$z = 0,5 \text{ mm}$
Hebelarm	$l_h = 1 \text{ mm}$
Weg	$s = 504 \text{ mm}$

Auf Basis dieser Werte und Gleichung 24 **errechnet sich für den Wickelprozess zur Herstellung der Kupferspule ein E_{GM} von 22,39 J pro Windung. Das ergibt bei einer Spulengröße von 90 Windungen einen $E_{GM, \text{Prozess}}$ von 2015 J.**

³² Ist die kritische Biegespannung σ_b für einen Werkstoff nicht bekannt, so lässt sich diese auf Basis der Zugfestigkeit R_m bestimmen. Diese Bestimmung erfolgt unter Berücksichtigung des Biegeradius und der Verschiebung der neutralen Faser in Richtung Biegeinnenkante während des Biegevorgangs. [65] [104] Für alle gängigen Werkstoffe wurden zudem empirische Werte für σ_b ermittelt [119] [144].

Energieverbrauchserfassung am Schablonenwickler Risomat

Die Erfassung des Energieverbrauchs für die Durchführung des Wickelprozesses in Form der Größe $E_{C,Prozess}$ erfolgt mit Hilfe des unter Kapitel 9.2.1 beschriebenen Messkoffers. Hierzu wird der tatsächliche Endenergieverbrauch in Form von elektrischem Strom erfasst. Für die prozessspezifische Energieeffizienzbewertung des reinen Biegevorgangs wird hierzu die eingesetzte elektrische Energie in Form des E_{CM} für die Dauer der Ausführung von einem Wickelvorgang, am Schablonenwickler Risomat erfasst. Andere Energieträger und Betriebsstoffe sind für die Prozessdurchführung auf dem Schablonenwickler nicht erforderlich. Der Endenergiebedarf für den Einsatz von Betriebsstoffen E_{CB} ist in diesem Fall Null. Die Erfassung des Energieverbrauchs erfolgt in gleicher Weise, wie vorweg im Versuch für das Biegeumformen beschrieben, durch das Messgerät SENTRON PAC 4200. Die Dauer vom Start der Bewicklung bis zum Anhalten nach vollständigem Bewickeln beträgt 50,8 Sekunden. Die Zeit vom Anfahren bis zum Beginn des Wickelvorgangs sowie vom Ende des Wickelvorgangs bis zum erneuten Anfahren der Grundstellung wird bei der reinen Prozessbetrachtung auf der Laboranlage nicht berücksichtigt. Daraus ergibt sich ein Endenergieverbrauch $E_{C,Prozess}$ zur Durchführung des Wickelprozesses von 24112 J.

Ermittlung der REE für das Biegeumformen der CuZn10-Probe

Auf Basis der Werte von $E_{C,Prozess}$ und $E_{GM,Prozess}$ lässt sich gemäß Gleichung 46:

$$REE_{Prozess} = \left(1 - \frac{(E_{C,Prozess} - E_{GM,Prozess})}{E_{C,Prozess}} \right) \cdot 100\%$$

die Relative Energieeffizienz somit für den Prozess **Fügen durch umformen eines drahtförmigen Körpers am Beispiel des Schablonenwickelns beziffern mit einem Wert $REE_{Prozess}$ von 8,36 %**. In der folgenden Tabelle sind die Versuchsergebnisse im Überblick dargestellt:

Tabelle 21: Ergebnisse Schablonenwickeln

$E_{GM,Prozess}$	$E_{C,Prozess}$	$REE_{Prozess}$
2015 J	24112 J	8,36 %

Der Wert der Relativen Energieeffizienz für den Wickelprozess ist auf Basis der Prozesswiederholungen reproduzierbar. Im Vergleich zum vorausgegangenen Biegeversuch ergibt sich eine höhere Relative Energieeffizienz. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Wickelprozess auf einer für das Spulenwickeln konzipierten Produktionsmaschine durchgeführt wurde. Es wurde wiederholt eine REE im einstelligen Prozentbereich festgestellt. Dies lässt sich zurückführen auf die großen Massenunterschiede zwischen Maschine und dem zu bearbeitenden Werkstoff. Zudem müssen die massebehafteten Maschinenteile und Werkzeuge während der Prozessdurchführung teilweise durchgängig beschleunigt werden. So hat die Aufnahme der Wickelschablone eine Masse von 20 kg, die Wickelschablone selbst wiegt 4 kg und die Drehzahl beträgt

120 min⁻¹. Zudem hat der Drahtverleger eine Masse von 15 kg, einen Vorschub von 1,05 mm pro Umdrehung und einen Reibungskoeffizienten von 0,1. Der Verfahrensweg des Drahtverlegers beträgt 150 mm. Im Vergleich dazu hat der umzuformende Kupferdraht eine Masse von rund 0,35 kg. Weiterhin darf der Wirkungsgrad des Umrichters und der verwendeten Antriebe nicht außer Acht gelassen werden. Insbesondere nachdem es sich um eine Laboranlage für den universellen Einsatz handelt, die nicht auf den im Versuch dargestellten Spulentyp explizit optimiert ist. Auch fanden im Rahmen des Versuchs keine Optimierungen hinsichtlich der Prozess- und Werkzeugparameter statt.

9.2.4 Diskussion der Versuchsergebnisse aus Anwendersicht

Für den übergreifenden Vergleich der Energieeffizienz ist der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenz heranzuziehen. Wie gezeigt, ist dieser für die Fertigungsverfahren der DIN 8580 für den Einsatz reeller Werkstoffe auf Basis empirischer Werkstoffkennwerte ermittelbar. Er kann unabhängig der eingesetzten Produktionsmethode und der eingesetzten Betriebsmittel bestimmt werden.

Die Versuche verdeutlichen, dass prozessspezifisch theoretisch hohe Energieeinsparpotenziale vorhanden sind. Diese lassen sich darstellen durch die Kennzahl *REE*. Die Werte der *REE* der gezeigten Versuchsaufbauten bewegen sich im einstelligen Prozentbereich. Hierbei wurden universell einsetzbare Laboranlagen betrachtet. Weitergehende Versuche im Rahmen dieser Arbeit zeigen, dass sich die Werte der *REE* für klassische Produktionsanlagen zur Metallverarbeitung im Bereich zwischen 10% und 25% bewegen [122] [126]. Natürlich ist aus Anwendersicht darauf zu achten, welche Nennleistungen und absolute Verbräuche mit den jeweiligen Anlagen einhergehen, um möglichst hohe absolute Energieeinsparungen zu generieren. Im Gegensatz dazu weißten Prozesse auf sehr komplexen Anlagen lediglich *REE*-Werte im einstelligen Prozentbereich auf. Insbesondere wird dies noch verstärkt, wenn das Massenverhältnis zwischen Bauteil oder Werkstoff und den Betriebsmitteln stark differiert, wie auch schon in den vorangegangenen Versuchen gezeigt. So ist es auch nachvollziehbar, dass energieintensive Anlagen, auf welche seit jeher ein Augenmerk hinsichtlich Energieeinsparung gelegt wird, relativ energieeffizient arbeiten, im Vergleich zu Produktionsmaschinen die nicht als Hauptverbraucher gelten [131] [137]. Genau aus diesem Grund bieten bisweilen weniger betrachtete Prozesse oftmals ein hohes theoretisches Einsparpotenzial, da bisweilen keine eindeutige Aussage getroffen werden konnte.

Für den Bereich der Produktion hat eine eindeutige Bemessung der Energieeffizienz bisweilen nicht existiert, was wiederum die Bestrebungen dieser Arbeit unterstreicht, Einsparpotenziale durch eine Bewertungsmethode der Energieeffizienz transparent zu machen, um Verbesserungsmaßnahmen zielgerichtet abzuleiten und messbar umzusetzen.

10 Ermittlung der Relativen Energieeffizienz zur Bewertung von Produktionsstrukturen und Produkten

Auf Basis des Berechnungskonzepts zur Energieeffizienzbewertung von Produktionsstrukturen ist es möglich, operativ die Energieeffizienz aller Produktionsebenen eines Unternehmens sowie die Energieeffizienz der Herstellung eines Produkts zu bewerten. Diese Werkzeuge werden anhand eines Formelwerks im Folgenden dargestellt.

10.1 Das Vorgehen zur übergreifenden Bewertung von Unternehmens- und Produktionsstrukturen

Folgend dargestellt ist ein Berechnungsansatz zur Ermittlung der *REE* auf allen Betrachtungsebenen eines produzierenden Unternehmens, wie unter Kapitel 8.1 beschrieben. Den Referenzbezug zur Berechnung der *REE* bildet der grundoperationspezifische Mindestenergiebedarf. Bei dem Referenzobjekt handelt es sich um mindestens ein Produkt, dessen Energieeffizienz der Herstellung bewertet werden soll. Anhand eines Verrechnungsschlüssels wird auf dieser Basis eine spezifische *REE* für jede Betrachtungsebene ermittelt. Die Berechnung der *REE* erfolgt im ersten Schritt durch die Verbrauchsmessung an der Maschine. Ausgehend von der Maschinenebene erfolgt die Ermittlung der *REE* für den betrachteten Prozess entsprechend Richtungspfeil (1). Von der Prozessebene aus erfolgt die Ermittlung der *REE* stufenweise für alle weiteren Betrachtungsebenen bis hin zum Produkt, entsprechend den Richtungspfeilen (2) bis (6), wie in Abbildung 62 dargestellt.

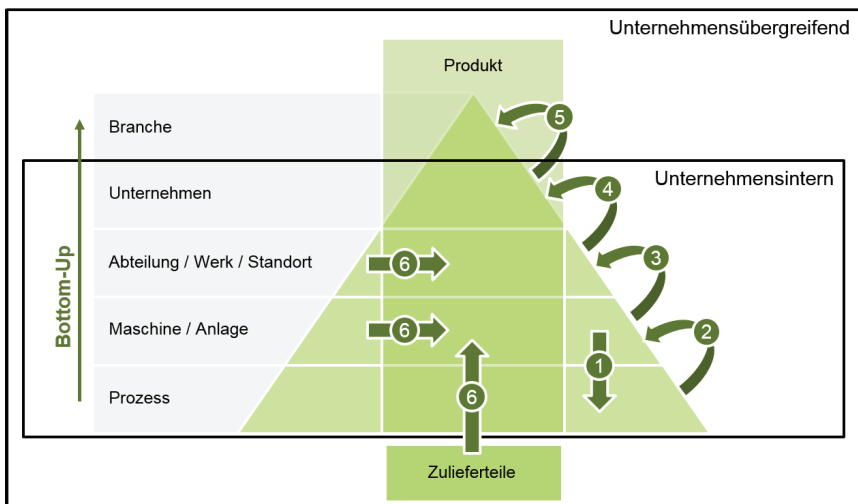


Abbildung 62: Bottom-Up-Ansatz zur Bewertung der Energieeffizienz aller Betrachtungsebenen eines produzierenden Unternehmens [128]

10.1.1 Ermittlung der REE zur Prozessbewertung

Im Rahmen der Prozessbetrachtung wird die Ausführung eines spezifischen Prozesses bei der Herstellung eines bestimmten Produkts hinsichtlich seiner Energieeffizienz bewertet. Die Transformation, die dem betrachteten Prozess obliegt, kann durch eine oder mehrere auszuführende Grundoperationen beschrieben werden. Diese prozessspezifischen Grundoperationen sind die Basis zur Bestimmung des **prozessspezifischen Mindestenergiebedarfs** $E_{GM,Prozess}$. Der prozessspezifische Mindestenergiebedarf wird ermittelt durch die Summe aller dem betrachteten Prozess zugrunde liegenden grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfe. Der prozessspezifische Mindestenergiebedarf bildet den Referenzwert zur Energieeffizienzbewertung des betrachteten Prozesses. Die Ermittlung der **prozessspezifischen Relativen Energieeffizienz** $REE_{Prozess}$ erfolgt für genau eine Prozessausführung. Zur Berechnung der $REE_{Prozess}$ wird der tatsächliche Energieeinsatz für die Betriebsmittel erfasst, welche den Prozess ausführen. Zur Ermittlung des tatsächlichen Energieeinsatzes ist es erforderlich, den gemessenen Endenergieverbrauch E_{CM} sowie den produktspezifisch gemessenen Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen $E_{CB,p}$ für den betrachteten Prozess zu erfassen. Die Prozessdurchführung und Energieverbrauchsmessung erfolgt entsprechend den unter Kapitel 8.3 beschriebenen Modalitäten zur Prozessbewertung. Im Falle, dass ein Betriebsmittel genau einen Prozess ausführt, ist die Zuordnung des gemessenen Energieverbrauchs eindeutig. Führt ein Betriebsmittel mehrere Prozesse durch, kann unter Umständen eine direkte Zuordnung des Energieverbrauchs zum betrachteten Prozess messtechnisch nicht möglich sein. Für diesen Fall ist es erforderlich, den Betrachtungsprozess entsprechend der messtechnischen Zuordenbarkeit des gemessenen Energieverbrauchs zu definieren. [129] Allgemein ausgedrückt ergibt sich für die REE auf Prozessebene mit:

$E_{GM,Prozess}$	Grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf zur Ausführung des Prozesses [Ws]
$E_{C,Prozess}$	Tatsächlich gemessener Energieverbrauch zur Ausführung des Prozesses [Ws]
$E_{CM,Prozess}$	Tatsächlicher Endenergieeinsatz an der Maschine zur Ausführung des Prozesses [Ws]
$E_{CB,Prozess,p}$	Tatsächlicher Endenergieeinsatz zur produktspezifischen Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen zur Ausführung des Prozesses [Ws]

$$REE_{Prozess} = \left(1 - \frac{(E_{C,Prozess} - E_{GM,Prozess})}{E_{C,Prozess}} \right) \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 46}$$

Mit:

$$E_{GM,Prozess} = \sum_{i=1}^n (E_{GM})_i; n \in \mathbb{N} \quad \text{Gleichung 47}$$

$$E_{C,Prozess} = E_{CM,Prozess} + E_{CB,Prozess,p} \quad \text{Gleichung 48}$$

10.1.2 Ermittlung der REE zur Maschinen- und Anlagenbewertung

Im Rahmen der Maschinen- und Anlagenbetrachtung, folgend mit Anlage bezeichnet, wird die Energieeffizienz der Anlage während des Produktionsbetriebs bewertet.

Hierbei ist die Komplexität der Betrachtungsebene Anlage zu beachten. Es ist denkbar, dass nicht nur eine einzige, sondern mehrere, unterschiedliche Prozessketten auf einer Anlage ausgeführt werden. Jede Prozesskette kann dabei genau einem Produkt zugeordnet werden. Da sich die verschiedenen produktspezifischen Prozessketten auf Anlagenebene unter Umständen unterscheiden, muss bei der Energieeffizienzbewertung der Anlage differenziert werden. Zum einen besteht die Möglichkeit, die Energieeffizienz einer Anlage auf Basis des kompletten Spektrums, der auf ihr durchgeführten Prozessketten zu bewerten. Zum anderen besteht die Möglichkeit, die Energieeffizienz einer Anlage produktbezogen zu ermitteln, unter der Annahme es würde nur eine produktspezifische Prozesskette auf der Anlage ausgeführt.

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Energieeffizienzbewertung einer Anlage für die Ausführung einer spezifischen Prozesskette zur Herstellung eines bestimmten Produkts dargestellt. Bei dieser Prozesskette handelt es sich um einen zeitlich und örtlich bestimmten technologischen Vorgang zur Umsetzung einer definierten Transformation, im Rahmen der gesamten Prozesskette zur Herstellung eines Produkts. Die Prozesskette, die auf der betrachteten Anlage durchgeführt wird, kann durch eine oder mehrere auszuführende Grundoperationen beschrieben werden. Diese prozessketten-spezifischen Grundoperationen sind die Basis zur Bestimmung des **prozessketten-spezifischen Mindestenergiebedarfs** $E_{GM,PK,Produkt}$, bezogen auf ein Produkt (:= *Index Produkt*). Der prozessketten-spezifische Mindestenergiebedarf wird ermittelt durch die Summe aller der betrachteten Prozesskette zugrundeliegenden grundoperations-spezifischen Mindestenergiebedarfe. Der prozessketten-spezifische Mindestenergiebedarf bildet den Referenzwert zur Energieeffizienzbewertung der betrachteten Anlage. Die Ermittlung der **anlagenspezifischen Relativen Energieeffizienz** $REE_{Anlage,Produkt}$, bezogen auf ein bestimmtes Produkt, erfolgt für die Ausführung der zugehörigen spezifischen Prozesskette.

Zur Berechnung der $REE_{Anlage,Produkt}$ wird der tatsächliche Energieeinsatz für die Anlage erfasst, welche die spezifische Prozesskette ausführt. Zur Ermittlung des tatsächlichen Energieeinsatzes ist es erforderlich, den gemessenen Endenergieverbrauch E_{CM} sowie den produktspezifisch gemessenen Endenergieverbrauch zur Erzeugung

und Bereitstellung von Betriebsstoffen $E_{CB,p}$ für die Ausführung der spezifischen Prozesskette zu erfassen. Die Durchführung der Energieverbrauchsmessung erfolgt entsprechend den unter Kapitel 8.3 beschriebenen Modalitäten zur Anlagenbewertung. Zur Bewertung der Anlage für ein bestimmtes Produkt, umfasst die Dauer der Messung den Zeitraum, der für die Ausführung eines produkttypischen Fertigungsauftrages erforderlich ist. Die Dauer zur Ausführung des Fertigungsauftrags ist definiert durch die Betriebszeit für das Rüsten, das Anlaufen und das Produzieren bis zum letzten Teil. Die Dauer des Produzierens ist definiert durch die Anzahl der zu produzierenden Gutteile und der anteiligen Gutteile der gesamten Ausbringungsmenge dem sog. *Yield*³³, zur Erfüllung des Fertigungsauftrages. Die erforderliche Produktionsdauer zur Erreichung des *Yields* ist abhängig von der anfallenden Ausschussrate. Der produzierte Ausschuss muss berücksichtigt werden, da die Anlage auch während der Produktion von Ausschussteilen Energie verbraucht. Der *Yield* bezieht die Anzahl aller gefertigten Teile im Verhältnis zu allen anfallenden Ausschussteilen am Ende der spezifischen Prozesskette. Eine mögliche Entnahme von Ausschussteilen oder die Zuführung von Nacharbeitsteilen innerhalb der Abläufe der spezifischen Prozesskette wird nicht berücksichtigt. Zur Bewertung der Anlage wird von einer geschlossenen Prozesskette ausgegangen, für die ein bestimmter Energieeinsatz erforderlich ist. Somit ergibt sich zur Berechnung der **anlagenspezifischen Relativen Energieeffizienz** $REE_{Anlage,Produkt}$, bezogen auf ein bestimmtes Produkt, folgender Zusammenhang:

$E_{GM,PK,Produkt}$	Grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf zur Ausführung der produktspezifischen Prozesskette [Ws]
$E_{C,Anlage}(N)$	Tatsächlich gemessener Energieverbrauch zur Ausführung der produktspezifischen Prozesskette für die Herstellung von N Stück [Ws]
$N_{Produkt}$	Gesamtstückzahl der produzierten Erzeugnisse im betrachteten Zeitraum [ohne Einheit]
$Y_{Produkt}$	<i>Yield</i> : Anteil der Gutteilmenge der Gesamtausbringungsmenge im betrachteten Zeitraum [%]
$E_{CM,Anlage}(N)$	Tatsächlicher Endenergieeinsatz an der Anlage zur Herstellung von N Stück [Ws]
$E_{CB,Anlage,p}(N)$	Tatsächlicher Endenergieeinsatz zur produktspezifischen Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen an der Anlage zur Herstellung von N Stück [Ws]

³³ Der Begriff „Yield“ bedeutet „Ausbeute“ oder „Ausschöpfung“. Das Yield-Management wird in der Literatur auch als „Ertragsmanagement“ oder „Ausschöpfungsmanagement“ bezeichnet [17].

$$REE_{Anlage, Produkt} = \left(1 - \frac{(E_{C, Anlage} - E_{GM, PK, Produkt})}{E_{C, Anlage}} \right) \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 49}$$

Mit:

$$E_{GM, PK, Produkt} = \sum_{i=1}^n (E_{GM, Prozess})_i \cdot N_{Produkt} \cdot Y_{Produkt} ; n \in \mathbb{N} \quad \text{Gleichung 50}$$

$$E_{C, Anlage(N)} = E_{CM, Anlage(N)} + E_{CB, Anlage, p(N)} \quad \text{Gleichung 51}$$

Im Falle, dass eine Anlage nur eine spezifische Prozesskette für ein bestimmtes Produkt ausführt, ist die Bewertung der Anlage bezogen auf das Produkt eindeutig. Werden auf der betrachteten Anlage unterschiedliche Prozessketten von unterschiedlichen Produkten durchgeführt, ist die Bewertung der gesamten Anlage hinsichtlich ihrer Energieeffizienz ebenfalls möglich.

Als Referenzwert für die Energieeffizienzbewertung einer Anlage dient für diesen Fall der **prozesskettenspezifische Mindestenergiebedarf** $E_{GM, PK}$, bezogen auf alle produktspezifischen Prozessketten, die auf der Anlage ausgeführt werden. Der prozesskettenspezifische Mindestenergiebedarf, für alle auf der Anlage ausgeführten Prozessketten, lässt sich ermitteln aus der Summe aller, der betrachteten Prozessketten zugrundeliegenden, grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfe. Die Ermittlung der **anlagenspezifischen Relativen Energieeffizienz** REE_{Anlage} , bezogen auf alle Produkte, die auf der Anlage gefertigt werden, erfolgt für die einmalige Ausführung aller zugehörigen spezifischen Prozessketten.

Zur Berechnung der REE_{Anlage} wird der tatsächliche Energieeinsatz für die Anlage erfasst, welche die spezifischen Prozessketten ausführt. Zur Ermittlung des tatsächlichen Energieeinsatzes ist es erforderlich, den gemessene Endenergieverbrauch E_{CM} sowie den produktspezifischen gemessenen Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen $E_{CB, p}$ für die Ausführung der spezifischen Prozessketten zu erfassen. Die Durchführung der Energieverbrauchsmessung erfolgt entsprechend den unter Kapitel 8.3 beschriebenen Modalitäten zur Anlagenbewertung. Zur Bewertung der Anlage für alle auf ihr ausgeführten Prozessketten, umfasst die Dauer der Messung den Zeitraum, der für die einmalige Ausführung eines produkttypischen Fertigungsauftrages für jedes Produkt erforderlich ist. Die Dauer zur Ausführung aller Prozessketten ist bestimmt durch die Anzahl der produkttypischen Fertigungsaufträge. Dieser Zeitraum beginnt mit dem Start des Fertigungsauftrags für das erste Produkt und endet mit dem letzten gefertigten Teil, des letzten produktspezifischen Fertigungsauftrags. Die Dauer zur Durchführung eines einzelnen Fertigungsauftrags ist definiert durch die Betriebszeit für das Rüsten, das Anlaufen und das Produzieren bis zum letz-

ten Teil. Die Dauer des Produzierens ist definiert durch die Anzahl der zu produzierenden Gutteile und dem *Yield*, zur Erfüllung jedes einzelnen Fertigungsauftrages. Die erforderliche Produktionsdauer zur Erreichung des *Yields* ist abhängig von der anfallenden Ausschussrate, entsprechend der Beschreibung vorweg, zur Anlagenbewertung für nur ein bestimmtes Produkt. Somit ergibt sich zur Berechnung der **anlagen-spezifischen Relativen Energieeffizienz** REE_{Anlage} , bezogen auf alle ausgeführten Prozessketten, folgender Zusammenhang, mit

$E_{GM,PK}$ Grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf zur Ausführung aller betrachteten produktspezifischen Prozessketten [Ws]

$E_{C,Anlage}(N)$ Tatsächlich gemessener Energieverbrauch zur Ausführung aller betrachteten produktspezifischen Prozessketten für die Herstellung von N Stück aller Produkte [Ws]

$$REE_{Anlage} = \left(1 - \frac{(E_{C,Anlage} - E_{GM,PK})}{E_{C,Anlage}}\right) \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 52}$$

Mit:

$$E_{GM,PK} = \sum_{i=1}^n (E_{GM,PK,Produkt})_i ; n \in \mathbb{N} \quad \text{Gleichung 53}$$

$$E_{C,Anlage}(N) = E_{CM,Anlage}(N) + E_{CB,Anlage,p}(N) \quad \text{Gleichung 54}$$

10.1.3 Ermittlung der REE zur Werksbewertung

Auf der Betrachtungsebene Werk, wird die Energieeffizienz eines produzierenden Werks, bezogen auf alle in diesem Werk produzierten Produkte, bewertet.

Hierbei ist die Komplexität der Betrachtungsebene Werk zu beachten. Es ist denkbar, dass nicht nur eine einzige, sondern mehrere, unterschiedliche Prozessketten auf unterschiedlichen Anlagen ausgeführt werden.

Auf Werksebene kommen zusätzliche Einflussfaktoren auf den erforderlichen Energieeinsatz durch die Produktionsumgebung hinzu. Diese wirken sich vor allem auf den Energieverbrauch der Peripherie des Werkes aus, welcher sich unter Umständen nicht direkt einer Produktionsanlage oder einem Produkt zurechnen lässt, aber unerlässlich für die Produktion ist. Die erforderliche Nutzenergie die im Rahmen der Produktion bereitzustellen ist, ist aufgrund der möglichen Zurechenbarkeit differenziert zu betrachten. Des Weiteren obliegt der Bedarf der Nutzenergie für ein Werk saisonalen Witterungsbedingungen. Aus diesem Grund ist die Erfassung aller Energieverbräuche über

den Zeitraum von einem Jahr durchzuführen. Im Folgenden wird die Energieeffizienzbewertung eines Werks, unter Einbezug des gesamten Produktspektrums, dargestellt. Als Referenzwert für die Energieeffizienzbewertung eines Werks dient für diesen Fall der **werksspezifische Mindestenergiebedarf** $E_{GM,WK}$, bezogen auf alle produktspezifischen Prozessketten die auf den zugehörigen Anlagen des betrachteten Werks ausgeführt werden.

Der werksspezifische Mindestenergiebedarf, für alle auf den Anlagen des Werks ausgeführten Prozessketten, lässt sich ermitteln aus der Summe aller, der betrachteten Prozessketten zugrundeliegenden, grundoperationsspezifischen Mindestenergiebedarfe. Der werksspezifische Mindestenergiebedarf $E_{GM,WK}$ entspricht somit der Summe aller produktbezogenen prozesskettenspezifischen Mindestenergiebedarfe $E_{GM,PK,Produkt}$ wie im vorhergehenden Abschnitt zur Anlagenbetrachtung beschrieben.

Die Ermittlung der **werksspezifischen Relativen Energieeffizienz** REE_{Werk} , bezogen auf alle Produkte, die auf den Anlagen des Werks gefertigt werden, erfolgt für die Ausbringung aller produzierten Teile während eines vollen Jahres.

Zur Berechnung der REE_{Werk} wird der tatsächliche Energieeinsatz für alle Anlagen erfasst, welche die spezifischen Prozessketten des gesamten Produktspektrums ausführen. Zur Ermittlung des tatsächlichen Energieeinsatzes ist es erforderlich, den gemessenen Endenergieverbrauch E_{CM} sowie den produktspezifischen gemessenen Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen $E_{CB,p}$ für die Ausführung der spezifischen Prozessketten an den jeweiligen Anlagen zu erfassen. Ferner ist es auch erforderlich, den tatsächlichen Endenergieeinsatz zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen zur globalen Nutzung $E_{CB,g}$ im Werk zu erfassen.

Darüber hinaus ist es erforderlich, den Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung der produktionsbezogenen Nutzenergie zu erfassen. Dies geschieht durch die Erfassung des produktspezifisch gemessenen Endenergieverbrauchs zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie $E_{CN,p}$ und durch die Erfassung des global gemessenen Endenergieverbrauchs zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie $E_{CN,g}$. Die Durchführung der Energieverbrauchsmessung erfolgt entsprechend den unter Kapitel 8.3 beschriebenen Modalitäten zur Werksbewertung.

Zur Bewertung des Werks, bezogen auf alle produzierten Teile des Produktspektrums, umfasst die Dauer der Messung ein volles Jahr. Des Weiteren sind die tatsächliche Ausbringungsmenge sowie der Ausschussanteil der gefertigten Teile, wie zur Bewertung der Anlagenebene, über diesen Zeitraum zu berücksichtigen. Somit ergibt sich zur Berechnung der **werksspezifischen Relativen Energieeffizienz** REE_{Werk} , bezogen auf alle im Werk gefertigten Teile, folgender Zusammenhang:

$E_{GM,WK} (N)$	Grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf zur Herstellung von N Stück in einem Jahr [Ws]
$E_{C,Werk} (N)$	Tatsächlich gemessener Energieverbrauch des Werks zur Herstellung von N Stück in einem Jahr [Ws]
$N_{Produkt}$	Gesamtstückzahl der produzierten Erzeugnisse je Produkt in einem Jahr [<i>ohne Einheit</i>]
$Y_{Produkt}$	Yield; Anteil der Gutteilmenge der Gesamtausbringungsmenge je Produkt in einem Jahr [%]
$E_{CM,Anlage} (N)$	Tatsächlicher Endenergieeinsatz an allen Anlagen im Werk zur Herstellung von N Stück in einem Jahr [Ws]
$E_{CB,Anlage,p} (N)$	Tatsächlicher Endenergieeinsatz zur produktspezifischen Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen für alle Anlagen im Werk zur Herstellung von N Stück in einem Jahr [Ws]
$E_{CB,WK,g} (N)$	Tatsächlicher Endenergieeinsatz zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen zur globalen Nutzung im Werk zur Herstellung von N Stück in einem Jahr [Ws]
$E_{CN,WK,p} (N)$	Tatsächlicher Endenergieeinsatz zur Erzeugung und Bereitstellung produktbezogener Nutzenergie im Werk zur Herstellung von N Stück in einem Jahr [Ws]
$E_{CN,WK,g} (N)$	Tatsächlicher Endenergieeinsatz zur Erzeugung und Bereitstellung globaler Nutzenergie im Werk zur Herstellung von N Stück in einem Jahr [Ws]

$$REE_{Werk} = \left(1 - \frac{(E_{C,Werk} - E_{GM,WK})}{E_{C,Werk}} \right) \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 55}$$

Mit:

$$E_{GM,WK} = \sum_{i=1}^r (E_{GM,PK,Produkt})_i = \sum_{i=1}^n (E_{GM,Prozess})_i \cdot N_{Produkt} \cdot Y_{Produkt} ; n \in \mathbb{N}$$

Gleichung 56

n = Anzahl der Prozesse im Rahmen einer produktspezifischen Prozesskette

r = Anzahl aller auf Anlagen im Werk durchgeführten Prozessketten unter Berücksichtigung der produktspezifischen Stückzahl und des Yields

$$E_{C,Werk(N)} = \sum_{i=1}^t (E_{CM,Anlage(N)})_i + \sum_{i=1}^t (E_{CB,Anlage,p(N)})_i \\ + \sum_{i=1}^p (E_{CN,WK,p(N)})_i + E_{CN,WK,g(N)} + E_{CB,WK,g(N)}$$

Gleichung 57

t = Anzahl aller im Werk betriebenen Anlagen

p = Anzahl aller im Werk gefertigter Produkttypen

10.1.4 Ermittlung der REE zur Unternehmensbewertung

Auf der Betrachtungsebene Unternehmen, wird die Energieeffizienz eines produzierenden Unternehmens, bezogen auf alle produzierten Produkte, bewertet. Ein Unternehmen stellt eine organisatorische Einheit dar.

Aus diesem Grund sind auf dieser Betrachtungsebene keine zusätzlichen Energieverbräuche zur Energieeffizienzbewertung der produzierenden Bereiche zu berücksichtigen. Dies geschieht bereits vollständig bei der Bewertung der vorher beschriebenen Betrachtungsebenen.

Die Berechnung der **unternehmensspezifischen Relativen Energieeffizienz** $REE_{Unternehmen}$ erfolgt auf Basis der allgemeinen Gleichung 44 der relativen Energieeffizienz, durch die Addition aller Mindestenergiebedarfe und Energieverbräuche auf Werksebene. Da der tatsächliche Energieeinsatz aller produzierenden Bereiche bereits auf der Betrachtungsebene Werk berücksichtigt ist, erfolgt die Berechnung auf Basis der werksspezifischen Größen $E_{GM,WK}$ für den Mindestenergiebedarf und $E_{C,Werk}$ für den tatsächlichen Energieverbrauch.

Für den Fall, dass ein Unternehmen lediglich in einem Werk produziert, entspricht die $REE_{Unternehmen}$ auf Unternehmensebene der REE_{Werk} auf Werksebene. Dies gilt analog, wenn die Struktur eines Werks einer Abteilung oder einem Standort entspricht [127]. Somit ergibt sich für die Bewertung der Energieeffizienz eines Unternehmens, auf Basis aller zugehörigen Werke:

$E_{GM,UN(N)}$ Grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf zur Herstellung von N Stück in einem Jahr [Ws]

$E_{C,UN(N)}$ Tatsächlich gemessener Energieverbrauch aller produzierender Bereiche eines Unternehmens zur Herstellung von N Stück in einem Jahr [Ws]

$$REE_{Unternehmen} = \left(1 - \frac{(E_{C,UN} - E_{GM,UN})}{E_{C,UN}} \right) \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 58}$$

Mit:

$$E_{GM,UN(N)} = \sum_{i=1}^w (E_{GM,WK(N)})_i \quad \text{Gleichung 59}$$

$$E_{C,UN(N)} = \sum_{i=1}^w (E_{C,Werk(N)})_i \quad \text{Gleichung 60}$$

w = Anzahl der unternehmenszugehörigen Werke

10.1.5 Ermittlung der REE zur Branchenbewertung

Die Berechnung der **branchenspezifischen Relativen Energieeffizienz** $REE_{Branche}$ erfolgt anhand des arithmetischen Mittels der Werte der $REE_{Unternehmen}$ der erfassten Unternehmen.

Da eine Gewichtung anhand der Energieverbräuche der Unternehmen lediglich dann exakt wäre, wenn die Gesamtheit aller Unternehmen einer Branche erfasst würden, [127] gilt mit:

$REE_{Unternehmen}$ Relative Energieeffizienz eines Unternehmens [%]

für die REE auf Branchenebene:

$$REE_{Branche} = \frac{\sum_{i=1}^u REE_{Unternehmen\ i}}{u} \quad \text{Gleichung 61}$$

u = Anzahl aller erfassten Unternehmen einer Branche

10.2 Das Vorgehen zur Bewertung eines Produkts hinsichtlich seiner energieeffizienten Herstellung

Die Bewertung der Energieeffizienz der Herstellung eines Produkts basiert auf den vorher beschriebenen Energieeffizienzbewertungen der spezifischen Betrachtungsebenen. Hierbei ist die Komplexität der Produktbewertung zu beachten.

Zur Herstellung eines Produkts, ist es denkbar, dass mehrere Prozessketten, auf mehreren Anlagen in mehreren Werken erforderlich sind. Wird die Wertschöpfungskette eines Produkts betrachtet, kann weiterhin festgestellt werden, dass diese, insbesondere bei Vorliegen einer hohen Komplexität, in den seltensten Fällen vollständig in einem Unternehmen liegt. Soll das Endprodukt hinsichtlich seiner Energieeffizienz bei der Herstellung bewertet werden, so muss dementsprechend auch die Herstellung der Zulieferteile in ebendiese Energieeffizienzbewertung mit einfließen. Zudem muss die

erforderliche Nutzenergie, die im Rahmen der Produktion für das Produkt bereitzustellen ist, aufgrund der möglichen Zurechenbarkeit differenziert mit in die Berechnung einfließen.

Der Nutzenergiebedarf für die Logistik wird an dieser Stelle, wie unter Kapitel 1.4 definiert, nicht mit einbezogen, da die Bewertung der Energieeffizienz der Herstellung eines Produkts im Fokus steht. Zudem unterliegt die Distribution in einem globalen Weltmarkt politischen Einflussfaktoren, die sich zusätzlich auf den tatsächlichen Energieverbrauch auswirken. Im Rahmen der fachlichen Bewertung der Energieeffizienz der Produktherstellung gilt es, solche instabile Einflussfaktoren zu vermeiden.

Als Referenzwert für die Energieeffizienzbewertung der Herstellung eines Produkts dient der **produktspezifische Mindestenergiebedarf** $E_{GM,Produkt}$. Der produktspezifische Mindestenergiebedarf entspricht der Summe aller Mindestenergiebedarfe E_{GM} , der für die Produktherstellung durchzuführenden Grundoperationen. Um für die Bewertung der Produktherstellung eine direkte Zuordnung zwischen Mindestenergiebedarf und den dafür notwendigen Anlagen zu schaffen, wird auf den produktbezogenen prozesskettenspezifischen Mindestenergiebedarf $E_{GM,PK,Produkt}$ zurückgegriffen. Der produktspezifische Mindestenergiebedarf $E_{GM,Produkt}$ entspricht der Summe aller produktbezogenen prozesskettenspezifischen Mindestenergiebedarfe $E_{GM,PK,Produkt}$, die für die Herstellung des Produkts erforderlich sind, wie im vorhergehenden Abschnitt zur Anlagenbetrachtung beschrieben.

Die Ermittlung der **produktspezifischen Relativen Energieeffizienz** $REE_{Produkt}$, bezogen auf ein Produkt, welches auf unterschiedlichen Anlagen, in unterschiedlichen Werken produziert werden kann, erfolgt für die gesamte Anzahl der hergestellten Produkte während eines vollen Jahres.

Zur Berechnung der $REE_{Produkt}$ wird der tatsächliche Energieeinsatz für alle Anlagen erfasst, welche die spezifischen Prozessketten des Produkts ausführen. Die Ausführung der produktspezifischen Prozessketten kann im eigenen Unternehmen stattfinden (*folgend mit dem Index **intern** gekennzeichnet*). Darüber hinaus kann die Ausführung der produktspezifischen Prozessketten auch in anderen Unternehmen stattfinden und in Form von Zulieferteilen einem Endprodukt zugerechnet werden (*folgend mit dem Index **extern** gekennzeichnet*).

Zur Ermittlung des tatsächlichen Energieeinsatzes für das Produkt ist es erforderlich, den gemessenen Endenergieverbrauch E_{CM} sowie den produktspezifisch gemessenen Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen $E_{CB,p}$ für die Ausführung der spezifischen Prozessketten an den erforderlichen Anlagen zu erfassen. Ferner ist es auch erforderlich den tatsächlichen Endenergieeinsatz zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen zur globalen Nutzung $E_{CB,g}$ in den Werken, an denen das Produkt hergestellt wird, zu erfassen.

Darüber hinaus ist es notwendig, den Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung der produktionsbezogenen Nutzenergie zu erfassen. Dies geschieht durch die Erfassung des produktspezifisch gemessenen Endenergieverbrauchs zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie $E_{CN,p}$ und durch die Erfassung des global gemessenen Endenergieverbrauchs zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie $E_{CN,g}$. Die Erfassung des Endenergieverbrauchs, für alle Formen der erforderlichen Nutzenergie, erfolgt auf Werksebene entsprechend den unter Kapitel 8.3 beschriebenen Modalitäten zur Werksbewertung.

Der global gemessene Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie $E_{CN,g}$ sowie der Energieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen $E_{CB,g}$, kann dem betrachteten Produkt nicht direkt zugerechnet werden. Aus diesem Grund werden beide für die Berechnung der $REE_{Produkt}$ gewichtet. Die Gewichtung erfolgt auf Basis der Erfassung aller Energieverbräuche auf Werksebene. Die Gewichtung erfolgt anhand der anteiligen Energieverbräuche der Anlagen zur Herstellung des betrachteten Produkts, im Verhältnis zu den Energieverbräuchen aller eingesetzten Anlagen zur Herstellung aller Produkttypen des jeweiligen Werks.

Die Dauer der Erfassung der Energieverbräuche der Anlagen zur Herstellung des betrachteten Produkts ist determiniert durch die produzierte Stückzahl. Die Dauer der Erfassung der Energieverbräuche aller Anlagen zur Herstellung aller Produkttypen ist determiniert durch die gesamte produzierte Stückzahl während eines vollen Jahres.

Zur Bewertung des Produkts, bezogen auf alle selbst produzierten Teile und Zuliefererteile, umfasst somit die Dauer der Messung ein volles Jahr. Des Weiteren sind die tatsächliche Ausbringungsmenge sowie der Ausschussanteil der gefertigten Teile des betrachteten Produkts über diesen Zeitraum zu berücksichtigen. Diese Berücksichtigung erfolgt bereits auf Anlagenebene, da die Güte der Durchführung der einzelnen Prozessketten auf verschiedenen Anlagen unter Umständen schwanken kann. Somit ergibt sich zur Berechnung der **produktspezifischen Relativen Energieeffizienz** $REE_{Produkt}$ folgender Zusammenhang:

$E_{GM,Produkt}$	Grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf zur Herstellung des Produkts [Ws]
$E_{C,Produkt}(N)$	Tatsächlich gemessener Energieverbrauch zur Herstellung des Produkts für N Stück [Ws]
$N_{Produkt}$	Produzierte Gesamtstückzahl des betrachteten Produkts im Zeitraum von einem Jahr [ohne Einheit]
$Y_{Produkt}$	Yield; Anteil der Gutteilmenge der Gesamtausbringungsmenge des betrachteten Produkts im Zeitraum von einem Jahr [%]

M	Produzierte Gesamtstückzahl aller Produkte in einem Werk im Zeitraum von einem Jahr <i>[ohne Einheit]</i>
$E_{C,WK,Produkt}(N)$	Tatsächlich gemessener Energieverbrauch bezogen auf das betrachtete Produkt zur Herstellung in einem Werk für N Stück <i>[Ws]</i>
$E_{CB,WK,g}(N)$ gewichtet	Gewichteter Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen zur globalen Nutzung bezogen auf das betrachtete Produkt zur Herstellung in einem Werk für N Stück <i>[Ws]</i>
$E_{CN,WK,g}(N)$ gewichtet	Gewichteter Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung globaler Nutzenergie bezogen auf das betrachtete Produkt zur Herstellung in einem Werk für N Stück <i>[Ws]</i>

$$REE_{Produkt} = \left(1 - \frac{(E_{C,Produkt} - E_{GM,Produkt})}{E_{C,Produkt}} \right) \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 62}$$

Mit:

$$E_{GM,Produkt} = \sum_{i=1}^m (E_{GM,PK,Produkt,intern})_i + \sum_{i=1}^m (E_{GM,PK,Produkt,extern})_i \quad \text{Gleichung 63}$$

m = Anzahl aller für das Produkt erforderlicher Prozessketten

auf Basis:

$$E_{GM,PK,Produkt} = \sum_{i=1}^n (E_{GM,Prozess})_i \cdot N_{Produkt} \cdot Y_{Produkt} ; n \in \mathbb{N} \quad \text{Gleichung 64}$$

Mit:

$$E_{C,Produkt} = \sum_{i=1}^w (E_{C,WK,Produkt,intern})_i + \sum_{i=1}^w (E_{C,WK,Produkt,extern})_i \quad \text{Gleichung 65}$$

w = Anzahl der Werke an denen das Produkt gefertigt wird

auf Basis:

$$E_{C,WK,Produkt(N)} = \sum_{i=1}^a (E_{CM,Anlage(N)})_i + \sum_{i=1}^a (E_{CB,Anlage,p(N)})_i \\ + E_{CN,WK,p(N)} + E_{CN,WK,g(N)} gewichtet + E_{CB,WK,g(N)} gewichtet$$

Gleichung 66

a = Anzahl aller im Werk zur Herstellung des Produkts betriebenen Anlagen

Mit:

$$E_{CN,WK,g(N)} gewichtet = E_{CN,WK,g(M)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^a (E_{CM,Anlage(N)})_i + \sum_{i=1}^a (E_{CB,Anlage,p(N)})_i}{\sum_{i=1}^b (E_{CM,Anlage(M)})_i + \sum_{i=1}^b (E_{CB,Anlage,p(M)})_i}$$

Gleichung 67

$$E_{CB,WK,g(N)} gewichtet = E_{CB,WK,g(M)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^a (E_{CM,Anlage(N)})_i + \sum_{i=1}^a (E_{CB,Anlage,p(N)})_i}{\sum_{i=1}^b (E_{CM,Anlage(M)})_i + \sum_{i=1}^b (E_{CB,Anlage,p(M)})_i}$$

Gleichung 68

b = Anzahl aller im Werk betriebenen Anlagen

Durch die Anwendung des dargestellten Berechnungskonzepts, lassen sich Optimierungspotenziale in Form der Differenz zwischen den Mindestenergiebedarfen verschiedener Produkte sowie der Differenz in Bezug zum gemessenen Energieverbrauch darstellen. Sie geben Aufschluss über die Wechselwirkung von Material, Methode und Maschine hinsichtlich des zu erwartenden und tatsächlichen Energieverbrauchs. Das Stufendiagramm in Abbildung 63 zeigt eine Gegenüberstellung des berechneten Mindestenergiebedarfs zu den gemessenen Energieverbräuchen für die verschiedenen Betrachtungsebenen, bezogen auf ein bestimmtes Produkt.

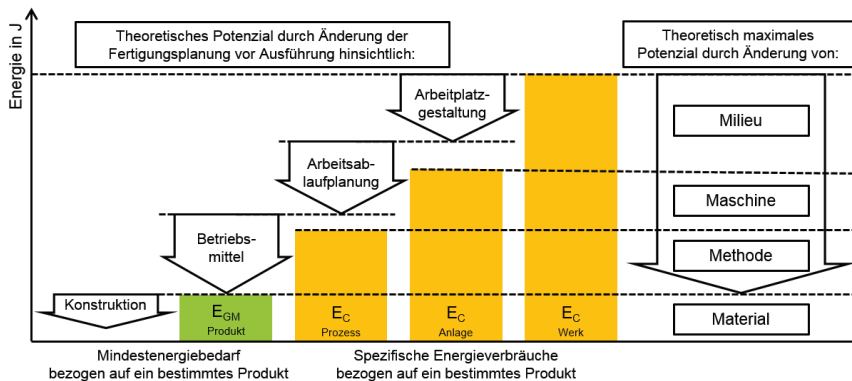


Abbildung 63: Stufendiagramm zur Potenzialdarstellung

11 Evaluation und Implementierung der Energieeffizienzbewertung auf Basis des Mindestenergiebedarfs

Im folgenden Kapitel wird die Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion auf Basis des Mindestenergiebedarfs evaluiert. Die Evaluierung geschieht durch die Gegenüberstellung zwischen der Kenngröße Relative Energieeffizienz und gebräuchlichen Kennzahlen und Methoden zur Energieeffizienzbewertung.

Des Weiteren werden mögliche Anwendungsbereiche der Bewertungssystematik, auf Basis des Mindestenergiebedarfs, sowie die Schnittstellen im operativen Umfeld eines Unternehmens dargestellt. Auf dieser Basis erfolgt ein Ausblick, wie und wo die Methode im betrieblichen Umfeld implementiert werden kann.

11.1 Vergleich von Energiekenngrößen nach den Anforderungen an eine Methode zur Bewertung der Energieeffizienz

Zur Validierung des Mindestenergiebedarfsansatzes wird dieser entsprechend den in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungskriterien an eine Methode zur Bewertung der Energieeffizienz unterzogen.

Der Vergleich obliegt einer quantitativen Gegenüberstellung aller Kapitel 3 zugrundeliegenden Energiekenngrößen sowie der Kenngröße Relative Energieeffizienz [124]. Die quantitative Gegenüberstellung basiert auf einer Portfolioanalyse. Die Portfolioanalyse stellt die Größen „Aussagekraft“ und „Anwendbarkeit“ der untersuchten Energieeffizienzkennzahlen gegenüber.

Die Größe „Aussagekraft“ einer Energieeffizienzkennzahl ist determiniert durch die in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungskriterien „Übergreifende Vergleichbarkeit“ und „Expressive Bewertung der Energieeffizienz“. Die Größe „Aussagekraft“ charakterisiert dadurch die Fähigkeit einer Kennzahl die Größe Energieeffizienz quantitativ zu bemessen und dadurch ihre Eignung einen übergreifenden Energieeffizienzvergleich zu realisieren.

Die Größe „Anwendbarkeit“ einer Energieeffizienzkennzahl ist determiniert durch die in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungskriterien „Anwendbarkeit auf Prozess-, Anlagen-, Abteilungs-/Werks-/Standort-, Unternehmens- und Branchenebene“. Des Weiteren umfasst die Größe Anwendbarkeit die beschriebenen Anforderungskriterien „Anwendbarkeit zur Energieeffizienzbewertung der Herstellung eines Produkts“ und die „Praxistauglichkeit“. Die Größe „Anwendbarkeit“ charakterisiert dadurch die Eignung einer Kennzahl für die operative Anwendung unter Berücksichtigung der Breite des Anwendungsbereiches.

Das Vorgehen zur Bewertung der Energieeffizienzkennzahlen orientiert sich am Vorgehen einer Nutzwertanalyse. Die Nutzwertanalyse ist eine Methode zum Vergleich beliebiger Objekte [31].

Zunächst werden Bewertungskriterien definiert. Die Bewertungskriterien entsprechen den beschriebenen Anforderungskriterien. Anschließend wird jede Kennzahl anhand der Kriterien bewertet, wobei die Bewertung anhand einer Zahlenskala erfolgt. Die Zahlenskala ist definiert von 1 für "Kriterium trifft nicht zu" bis 5 für „Kriterium trifft voll und ganz zu“. Die Summe der Bewertung wird abschließend auf den Zahlenbereich 0 bis 100 normiert. Diese Normierung dient der Übersichtlichkeit bei der Darstellung des Bewertungsergebnisses.

Im Folgenden ist das Bewertungsvorgehen graphisch in Form einer Portfoliodarstellung gezeigt. Die Achsen sind durch die beschriebenen Größen „Aussagekraft“ und „Anwendbarkeit“ dargestellt.

Der Darstellung umfasst die Bewertung der beschriebenen Kennzahlen und Methoden, aus welchen eine quantifizierbare Kenngröße zur Bewertung der Energieeffizienz hervorgeht. Der Durchmesser der dargestellten Kreise visualisiert das Spektrum der einzelnen Kenngrößen der jeweiligen Kennzahlen-Cluster.

Die Zugehörigkeit, der im Einzelnen bewerteten Kennzahlen, entspricht der Cluster-Zuordnung nach Kapitel 3.1 und spiegelt sich der Legende der Portfoliodarstellung wider. Die Lage der Kreise unterliegt dem quantitativen Ergebnis des beschriebenen Bewertungsvorgehens.

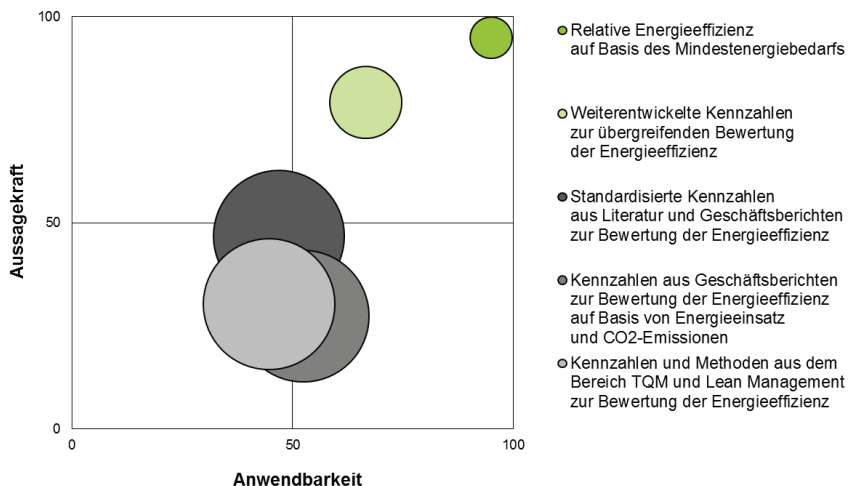


Abbildung 64: Portfolio Analyse von Kennzahlen zur Energieeffizienzbewertung

Im Vergleich der Kennzahlenvielfalt, lässt sich das überdurchschnittliche Abschneiden der Maßgröße „Relative Energieeffizienz auf Basis des Mindestenergiebedarfs“ durch ihre Überlegenheit in folgenden Punkten begründen:

- **Übergreifende Vergleichbarkeit**

Die Relative Energieeffizienz beschreibt den Vergleich und die Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion, basierend auf dem Verhältnis von der mindestens erforderlichen zur tatsächlich verbrauchten Energie. Dabei wird diese Relation in einer dimensionslosen Kennzahl dargestellt, um somit den Grad der Energieeffizienz eindeutig auszudrücken [112]. Hierdurch wird die Möglichkeit gegeben, unterschiedliche Produkte in Bezug auf ihre Herstellung sowie verschiedene Fertigungsprozesse und Ebenen eines Unternehmens zu vergleichen.

- **Expressive Bewertung der Energieeffizienz**

Durch den Einsatz eines Referenzwertes, der den Mindestenergiebedarf beziffert, sind Aussagen über das absolute Maß der Energieeffizienz und das tatsächliche Optimierungspotenzial, wie in Abschnitt 9 gezeigt, möglich. Die Kenngröße Relative Energieeffizienz (*REE*), gebildet auf Basis des Mindestenergiebedarfs, ist somit die einzige Kenngröße, die die Energieeffizienz als solches messbar beschreibt. Die Mehrheit der üblicherweise eingesetzten Kennzahlen und Methoden kann die Energieeffizienz lediglich anhand eines dimensionsbezogenen Referenzwertes vergleichen und nicht anhand des optimalen Energieeinsatzes. Die Interpretation solcher Bewertungen gibt lediglich Aufschluss über prinzipiell positive oder negative Entwicklungen entlang der Zeit, vermittelt aber kein Verständnis über die Abweichung zum optimalen Zustand und somit vorhandenem Potenzial.

- **Praxistauglichkeit**

Zur Gewährleistung einer operativen Anwendbarkeit und der Detektion von tatsächlichen Optimierungspotenzialen lässt sich die Bestimmung des Mindestenergiebedarfs als Referenzwert in die Prozesse eines Unternehmens auf allen Ebenen, wie in Abbildung 62 dargestellt, integrieren. Nach erfolgreicher Implementierung der Berechnungssystematik der Mindestenergiebedarfe kann die Erfassung der Energiedaten durch eine intelligente Messstelleninfrastruktur problemlos erfolgen. Zudem können Beziehungen und Abhängigkeiten konkreter Einflussfaktoren auf die Energieeffizienz verursachergerecht abgeleitet werden.

Die Relative Energieeffizienz auf Basis des Mindestenergiebedarfs gestattet dank der unabhängigen Vergleichsbasis prozess-, produkt-, unternehmens- und sogar branchenübergreifende Vergleiche.

Somit leistet diese Methode der Grundintention Folge, die Energieeffizienz eines Produkts hinsichtlich seiner Herstellung auf allen Ebenen mithilfe von Kennzahlen transparent, messbar und somit vergleichbar zu machen. Darüber hinaus vermag sie die Energieeffizienz expressiv auszudrücken.

11.2 Aussagekraft der Relativen Energieeffizienz auf Basis des Mindestenergiebedarfs als Bewertungsreferenzwert

Anhand der Kenngröße Relativen Energieeffizienz können verschiedene Herstellprozesse hinsichtlich ihrer Energieeffizienz bemessen, verglichen und beurteilt werden. Wird der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf mit dem gemessenen Energieverbrauch in Relation gesetzt, werden die theoretisch maximalen Einsparpotenziale ersichtlich. Wie bei der Verifizierung der Methode gezeigt, weichen jedoch theoretischer und gemessener Energieverbrauch in Abhängigkeit der Prozesskomplexität voneinander ab. Der ideal ermittelte grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf kann unter Umständen bei einem realen Produktionsprozess nicht erreicht werden. Der Mindestenergiebedarf ist zwar eine Referenz für das maximal mögliche Potenzial, welches aber in der realen Produktionslandschaft unter Umständen und ohne radikale technologische Veränderungen nicht vollständig ausgeschöpft werden kann.

Für einen übergreifenden Vergleich bildet er jedoch zum heutigen Stand der Technik die einzige sinnvolle Referenz aufgrund seiner Bestimmbarkeit für alle Fertigungsverfahren der DIN 8580, auf Basis gültiger Gesetzmäßigkeiten aus der Physik und der Chemie. Dies ermöglicht Technologiealternativen bei der Herstellung zu vergleichen und operativ konkrete prozesstechnische Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz abzuleiten. Ebenso kann die Erkenntnis über mögliche Energieeffizienzpotenziale zu Planungszwecken, in Form der Produktkonstruktion und Prozessplanung berücksichtigt werden. Zudem werden die vorhandenen Energieeinsparpotenziale der eigenen Anlagen und Produktionsstrukturen entsprechend den beschriebenen Betrachtungsebenen deutlich.

Zur Ableitung von konkreten Maßnahmen zur Ausschöpfung vorhandener Einsparpotenziale ist ein Ursachenbezug hinsichtlich dem Mindestenergiebedarf und dem Energieverbrauch essenziell. Bei der Betrachtung der Berechnungssystematik zeigt sich, dass eine direkte Ursachenzuordnung von Vergleichen in der Pyramide der Betrachtungsebenen, von der Ebene des Prozesses hin zur Branche abnimmt. Diese Reduktion der Aussagekraft ist dem Einbezug der vielfältigen, nicht direkt einem Produkt zuzuordnenden, Energiebräuchen auf den spezifischen Ebenen geschuldet. Insbesondere auf Produktebene ist bei der Berücksichtigung von Zulieferprodukten keine exakte Zuordnung möglich, da zudem davon ausgegangen werden muss, dass die theoretisch hierfür benötigten Prozess- und Energieverbrauchsdaten, aufgrund intransparenter externer Strukturen, nicht verfügbar sind.

An dieser Stelle sei betont, dass die Aussagekraft der *REE*, in Bezug zur Ableitung konkreter Energieeinsparmaßnahmen, in der Pyramide der Betrachtungsebenen nach oben hin abnimmt. Ein Vergleich der Energieeffizienz auf Werks-, Unternehmens- oder Branchenebene kann nur wenige Hinweise auf konkrete Energieeinsparpotenziale liefern. Zur Aufdeckung von Optimierungspotenzialen auf Basis von Vergleichen auf Pro-

zess- und Anlagenebene, stellt der direkte Ursachenbezug eine essenzielle Voraussetzung dar. Diese Bedingung wurde bei der Entwicklung der Berechnungssystematik erfolgreich berücksichtigt.

11.3 Herausforderungen bei der Anwendung

Den kritischen Schritt bei der Umsetzung dieser Bewertungsmethode stellt die Berechnung des Mindestenergiebedarfs dar. Die Komplexität bei der Berechnung entsteht dadurch, dass sich die Berechnungsweise je Herstellungsschritt individuell gestaltet.

Die einzelnen Herstellungsschritte lassen sich auf Basis der Fertigungsverfahren der DIN 8580 beschreiben. Der Aufbau der DIN 8580 obliegt allerdings nicht der Einteilung nach energetischen Zusammenhängen. Zur energetischen Beschreibung eines Herstellungsschrittes ist somit die Rückführung auf eine dafür notwendige Grundoperation notwendig. Erst eine Grundoperation kann energetisch eindeutig beschrieben werden. Diese energetische Beschreibung ist auf Basis gültiger physikalischer und chemischer Gesetzmäßigkeiten eindeutig möglich.

Unter Umständen kann bei bestimmten Produktionsprozessen heute noch auf kein einschlägiges Formelwerk zurückgegriffen werden, welches den Energiebedarf bei deren Durchführung ausreichend eindeutig beschreibt. Ferner kann unter Umständen ein bestimmter Produktionsprozess zwar auf eine eindeutige Grundoperation zurückgeführt werden, aber es fehlen unter Umständen die erforderlichen Werkstoffkenngrößen zur Berechnung des Mindestenergiebedarfs. Dies obliegt der grundsätzlich positiven Entwicklung, der ständigen Weiterentwicklung spezifischer Verfahren und Werkstoffe. Solche neuartigen Verfahren lassen sich mehrheitlich den Fertigungsverfahren der DIN 8580 aufgrund ihres Wirkens, durch welches die Einteilung der DIN 8580 determiniert ist, zuordnen. Die Durchführung solcher Verfahren obliegt unter Umständen allerdings empirischen Erfahrungswerten die wissenschaftlich noch nicht durchdrungen sind. Das gleiche gilt unter Umständen für den Einsatz neuartiger Werkstoffe. Eine Einordnung dieser neuartigen Werkstoffe in bestehende Werkstoffgruppen ist wohl möglich, allerdings ist deren Beschreibung durch Werkstoffkenngrößen unter Umständen noch nicht ausreichend fundiert.

Ist es der Fall, dass bestimmte Prozesse heute noch nicht eindeutig hinsichtlich ihrer energetischen Zusammenhänge beschrieben werden können, ist es erforderlich, den jeweiligen Prozess entsprechend den Modellen zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs eingehend zu analysieren. In diesem Zuge müssen prozessspezifisch die Einflüsse auf den Energieverbrauch erkannt und berücksichtigt werden.

Bereits bei der Darstellung und Verifizierung der Berechnungssystematik wird deutlich, dass die Ermittlung der Relativen Energieeffizienz auf allen Betrachtungsebenen mit einem hohen Messaufwand sowie einem entsprechend hohen Datenaufkommen verbunden ist. Dies stellt hohe Anforderungen sowohl an die Messinfrastruktur als auch an das Datenmanagement. Insbesondere die Datenerfassung stellt aus heutiger Sicht

unter Umständen eine Herausforderung dar. Aufgrund fehlender Messinfrastruktur an Bestandsanlagen ist ein Großteil der benötigten Daten noch nicht automatisiert erfassbar. Prinzipiell ist es jedoch möglich mit mobilen Energiezählern die erforderlichen Energieverbräuche zu erfassen.

Selbstverständlich bedingt ein solches Vorgehen erhöhten operativen Aufwand für den verantwortlichen Mitarbeiter. Dies obliegt jedoch der individuellen Strategie und der Einstellung eines Unternehmens gegenüber dem Thema Energieeffizienzsteigerung. Zwar ist auch eine Auswertung auf Basis einer unvollständigen Datenbasis möglich, wenn fehlende Werte abgeschätzt werden können, jedoch ist hierfür das Verständnis für die Berechnungssystematik und die im Unternehmen ablaufenden Prozesse unabdingbar. Dieses Vorgehen geht mit verminderter Genauigkeit und folglich einer geringeren Aussagekraft einher.

Die Aussagekraft der ermittelten *REE*-Werte nimmt darüber hinaus ab, wenn Datenerfassung und -auswertung nicht kontinuierlich erfolgen. Für die schnelle und einfache Auswertung größerer Datenmengen ist der Einsatz einer spezifischen Software von Vorteil. Diese erlaubt einerseits eine schnelle und einfache Berechnung der spezifischen Mindestenergiebedarfe, auf Basis der entsprechenden Parameter, und andererseits die Speicherung und Auswertung der Messdaten. Dies ermöglicht einen direkten internen Vergleich der ermittelten Kennzahlen. Auf dem Markt verfügbare Energiemanagement-Softwarelösungen verfügen teilweise bereits heute über Optionen, individuelle Energiekennzahlen zu definieren und diese kontinuierlich zu ermitteln.

An dieser Stelle sei darüber hinaus betont, dass der aktuelle Stand der Technik keine allgemeingültige Ableitung von Maßnahmen zur Energieeinsparung ermöglicht. Demnach besteht noch Handlungsbedarf: Es gilt, eine systematische Vorgehensweise zu entwickeln, die im Falle ermittelter *REE*-Unterschiede, die einfache Ableitung konkreter Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs ermöglicht, um eine tatsächliche Hebelwirkung zu entfalten.

11.4 Ausblick zur flächendeckenden Anwendung der REE zur Bewertung der Energieeffizienz im Unternehmen

Softwarelösung zur flächendeckenden Anwendung

Die Möglichkeit zur rechnergestützten Kalkulation der Mindestenergiebedarfe stellt die grundlegende Voraussetzung für die erfolgreiche Implementierung der entwickelten Bewertungsmethode im Unternehmen dar. Aufgrund dessen wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit ein benutzerfreundliches Software-Tool konzipiert, das die Durchführung der beschriebenen Kalkulationen erlaubt. Innerhalb des Programms sind die unterstützten Prozesse nach DIN 8580 strukturiert.

Der objektorientierte Aufbau ermöglicht dem Anwender das Anlegen eigener Prozesse zur Mindestenergiebedarfsermittlung sowie die Nutzung bereits erstellter Algorithmen. Somit wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben, mehrere Prozesse wie in einem

Baukastensystem auszuwählen oder diese um eigene zu ergänzen. Das Datenmodell der Anwendung greift auf ein bereits angelegtes Formelwerk zur *REE*-Bestimmung auf Prozessebene zurück. Langfristig soll dieses Tool, bereitgestellt über eine Open Data Online Plattform, die Schnittstelle zwischen einem betrieblichen Energiemanagementsystem und internen Datenbanken, ERP-Systemen oder gar NC-Steuerungen bieten.

Der Einsatz einer solchen Softwarelösung soll ein flächendeckendes, unternehmensübergreifendes Energieeffizienzbenchmarking realisierbar machen. Dies bietet die Möglichkeit, die dargestellte Systematik in die Breite zu tragen und als Basiswerkzeug für jedes Unternehmen zu dienen, um Optimierungspotenziale zu detektieren.

Als Instrument zur Unterstützung in den Bereichen Produktgestaltung, Prozessentwicklung und Fertigungssteuerung kann es zur Realisierung nachhaltiger Produktionsstrategien eingesetzt werden [63] [188]. Die Möglichkeiten der Anwendbarkeit in den genannten Unternehmensbereichen werden im Folgenden näher erläutert.

Operativer Einsatz zur Fertigungssteuerung

Ziel der Ressourcengrobplanung, der Kapazitätsabstimmung, der Feinterminierung und der Ressourcenfeinplanung ist eine gleichmäßige Kapazitätsauslastung [160]. Diese beschreibt das Verhältnis der tatsächlich produzierten Menge im Verhältnis zur maximal möglichen Menge [18]. Durch die Berücksichtigung von *REE*-Werten kann neben einer gleichmäßigen, auch eine energieeffiziente Kapazitätsauslastung angestrebt werden. Bei der Auftrags- und Ressourcenüberwachung findet ein permanenter Soll-/Ist-Vergleich der geplanten Mengen, Termine und Ressourcen statt [162]. Zusätzlich kann mittels der Betrachtung der *REE* eine energieeffiziente Auftragssteuerung umgesetzt werden. Neben der klassischen Produktionssteuerung und dem Produktionscontrolling, bietet die Bewertungsmethode weitere potenzialbergende Handlungsfelder zur Energieeinsparung innerhalb der Organisationsstruktur eines Unternehmens. Neben den Tätigkeiten in den Bereichen Produktdesign, Konstruktion und Anwendungstechnik, liegt der wesentliche Fokus dieses Abschnitts auf der Arbeitsvorbereitung und -planung, im Folgenden kurz als AV bezeichnet.

Integration der Mindestenergiebedarfsberechnung in die Arbeitsvorbereitung

Auf Basis der Datenanalyse der AV können die Verantwortungsbereiche, beziehungsweise die Daten identifiziert werden, die zur Berechnung der Mindestenergiebedarfe verwendet werden. Tabelle 22 zeigt relevante Größen und deren Bezug zum Planungsumfeld, die zur Berechnung der Mindestenergiebedarfe herangezogen werden. Gekennzeichnet wird dies durch die Spalte „ E_{GM} “ in der Tabelle.

Darüber hinaus zeigt die Tabelle die relevanten Größen und deren Bezug zum Planungsumfeld, die für die spätere Energieverbrauchserfassung berücksichtigt werden müssen. Gekennzeichnet wird dies durch die Spalte „ $E_{C(x)}$ “ in der Tabelle.

Tabelle 22: Relevante Daten zur Berechnung der Mindestenergiebedarfe und Zuordnung zum jeweiligen AV-Verantwortungsbereich

Daten	AV-Verantwortungsbereiche	E_{GM}	$E_{C(x)}$
Werkstoff	Prozessplanung	x	
Fertigteilegewicht	Prozessplanung	x	
Rohteilart	Prozessplanung	x	
Rohteilabmessung	Prozessplanung	x	
Rohteilgewicht	Prozessplanung	x	
Prozessbeschreibung	Prozessplanung	x	
Fertigungsmittel	Prozessplanung		x
Fertigungshilfsmittel	Prozessplanung		x
Bearbeitungsbereich	Operationsplanung		x
Bearbeitungsmaschinen	Fertigungsmittelplanung		x

Im Rahmen der Prozessplanung sind materialspezifische Angaben im Arbeitsplan hinterlegt, mit denen der E_{GM} berechnet werden kann. Durch die Prozessbeschreibung wird definiert, welche Grundoperationen durchgeführt werden. Die Verfahren und Technologien für die Durchführung der Grundoperation werden durch die Fertigungsmittelbestimmung in der Prozessplanung festgelegt. Folglich kann die Mindestenergiebedarfsberechnung in die Verantwortungsbereiche der Arbeitsplanung sehr gut implementiert werden. Die Berechnung des E_{GM} kann in die Prozessplanung optimal integriert werden [206].

Die erforderlichen Betriebsmittel und Produktionsbereiche zur tatsächlichen Produktherstellung sind durch die Bestimmung der Fertigungsmittel und -hilfsmittel in der Prozessplanung sowie durch die Festlegungen der Operationsplanung determiniert. In der Fertigungsmittelplanung im Rahmen der Arbeitssystemplanung werden die bestimmten Bearbeitungsmaschinen ausgewählt. Auf Basis dieser Informationen der AV kann die spätere Durchführung der Energieverbrauchsmessung bestimmt werden.

Mindestenergiebedarfe und REE als Entscheidungsgrundlage der AV

Im Rahmen der Prozessfolgeermittlung werden Prozesse bestimmt, die das Eingangsmaterial in den Endzustand überführen. Stehen mehrere Prozessalternativen zur Verfügung, werden diese nach dem zu betrachtenden Optimierungskriterium ausgewählt. Dieses Kriterium ist eine zeit- oder kostenoptimale Fertigung.

Durch die Betrachtung des Mindestenergiebedarfs wird eine energieeffiziente Fertigung bei der Festlegung der Prozesse angestrebt. Voraussetzung ist die Kenntnis des E_{GM} unterschiedlicher Grundoperationen für das gleiche Eingangsmaterial. Diese Min-

destenergiebedarfe müssen bei der Neuplanung eines Produkts für alle Alternativprozesse bei gleichen materialspezifischen Kenngrößen berechnet werden. Bei späteren Planungen werden diese Werte zur Entscheidung herangezogen. Die Kenntnis des E_{GM} kann darüber hinaus zur Verfahrens- und Technologiebestimmung, Werkzeugbestimmung sowie zur Optimierung der Prozessparameter und der Prozessreihenfolge herangezogen werden.

Dadurch können Entscheidungen unter energieeffizienten Gesichtspunkten getroffen werden, wie die Auswahl der energieeffizientesten Bearbeitungsmaschinen und die Planung der energetisch günstigsten Anordnungsstruktur.

Anwendungsmöglichkeiten im Produktentstehungsprozess

Abgeleitet von der Methods-Time-Measurement-Methode, bei der der Zeitbedarf für einzelne manuelle Bewegungsabläufe empirisch ermittelt und in Tabellen festgehalten wird [218], entspricht ein System vorbestimmter Mindestenergiebedarfe einem Katalog oder einem Tabellenwerk. In einem solchen können Mindestenergiebedarfe verschiedener Fertigungsprozesse aufgeführt sein. Unter dem Begriff methods-energy measurement (MEM) kann diese Systematik auch zur Planung und Ermittlung energieeffizienter Produktionsstrukturen genutzt werden. [26] [27]

Durch ein solches Vorgehen können Mindestenergiebedarfe für standardisierte Bauteile aus Tabellen entnommen und für das Gesamtbauteil addiert werden. Voraussetzung für dieses Vorgehen ist die Erstellung von Tabellen für die Fertigung von Standardelementen. In diesen Tabellen müssen genormte geometrische Größen sowie Angaben zu material- und verfahrensabhängigen Größen und die daraus berechneten Mindestenergiebedarfe enthalten sein [206]. Durch die Integration der Mindestbedarfsberechnung in die frühe Planungsphase von Produkten und Prozessen wird eine nachhaltige und energieeffiziente Produkt- und Prozessvorausplanung ermöglicht.

Im Bereich Anwendungstechnik und Arbeitsvorbereitung werden vor dem eigentlichen Produktionsbeginn die Prozesse und alle damit verbundenen Parameter bestimmt. Unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Prozessalternativen und Prozessparametern werden verschiedene Mindestenergiebedarfe berechnet. Diese geben Aufschluss über den energetisch günstigsten Prozess und ermöglichen so die Wahl einer optimalen und energieeffizienten Produktionsstrategie. Daraus ergeben sich Energieeinsparpotenziale, die bereits beim Produktionsstart ersichtlich sind und sich über den gesamten Produktionslebenszyklus erstrecken [135].

12 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund des bis dato geplanten Ausstiegs Deutschlands aus der Kernenergie sieht sich das Land einer immer weiter aufklaffenden Versorgungslücke gegenüber. Die erneuerbaren Energien sind noch nicht fähig, diese Lücke zu schließen und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Demnach besteht dringender Handlungsbedarf zur Senkung des Energieverbrauchs als nachhaltige Säule der Energiewende. Aufgrund der großen Hebelwirkung kommt dem verarbeitenden Gewerbe eine wichtige Bedeutung zu. Das verarbeitende Gewerbe ist maßgeblicher Treiber des Stromverbrauchs in Deutschland [7]. Dessen Branchen weisen relative Energieeinsparpotenziale bis über 20% auf [202]. Die Möglichkeit der eindeutigen Bemessung, Bewertung und des übergreifenden Vergleichs der Energieeffizienz birgt Potenziale zur Steigerung des Unternehmenserfolgs im Sinne einer Steigerung von Umsatz, Marktanteil und/oder Gewinn [237]. Zur maximalen Ausschöpfung vorhandener Potenziale muss gewährleistet sein, die Energieeffizienz über Produktgruppen hinweg und sogar unternehmens- und branchenübergreifend eindeutig bemessen, bewerten, vergleichen und beurteilen zu können. Nur so lassen sich hocheffiziente Produktionsstrukturen und konkrete Einsparpotenziale identifizieren, die als Vorbild und Referenz dienen können.

Der Begriff Energieeffizienz wird eindeutig definiert, nachdem aus der dargestellten Analyse keine einheitliche Beschreibung zum Stand der Technik existiert. Dieses Vorgehen gilt als grundlegend und dient als Basis zur Ableitung einer Systematik für deren Beurteilung. Demzufolge gibt die definierte Relative Energieeffizienz Aufschluss über den Zielerreichungsgrad der absoluten Energieeffizienz und gestattet eine Aussage über das theoretisch mögliche Energieeinsparpotenzial.

Anhand der Analyse vorhandener Kennzahlen und Methoden sollen mögliche Instrumente für einen übergreifenden Energieeffizienzvergleich identifiziert werden. Hierfür werden Bewertungskriterien auf Basis grundlegender Anforderungen an eine Methodik zur Energieeffizienzbewertung definiert. Bis dato entwickelte Kennzahlen, TQM, Lean Management und Six Sigma Methoden wurden hinsichtlich ihrer Eignung für einen Energieeffizienzvergleich analysiert. Kennzahlen und Methoden, die sich als prinzipiell geeignet herausstellen, wurden für einen Energieeffizienzvergleich neu konzeptioniert. Entsprechend der Analyse sind einzelne Methoden und Kennzahlen eingeschränkt für einen Energieeffizienzvergleich auf bestimmten Betrachtungsebenen anwendbar. Es existiert mit ihnen bisweilen aber kein Instrument zur Bemessung und übergreifenden Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion, zumal durchgängig keine eindeutigen energetischen Referenzbezüge verwendet werden bzw. bis dato nicht existieren.

Ein übergreifender Vergleich der Energieeffizienz kann nur anhand einer Systematik erfolgen, aus der eine quantifizierbare und vergleichbare Größe hervorgeht. Da eine solche Größe bis dato nicht existiert, wurde diese entwickelt. Dafür wurden zunächst

potenzialträchtige Ansätze betrachtet, die eine übergreifende Bewertung der Energieeffizienz prinzipiell ermöglichen. Basierend auf dem Ansatz, dass für die Durchführung eines Produktionsprozesses ein mindestens erforderlicher Betrag an Energie definiert werden kann, der Mindestenergiebedarf, wird eine Berechnungssystematik hergeleitet und beschrieben. Diese wird anschließend auf alle Betrachtungsebenen eines produzierenden Unternehmens skaliert und auf ein Produkt als solches projiziert.

Da sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Einflussgrößen auf den Energieverbrauch auswirkt, sind der erste Schritt der Herleitung der Berechnungssystematik die Erfassung und die Analyse aller Einflussgrößen. Im zweiten Schritt werden die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der erfassten Einflussgrößen in einem Modell abgebildet. Anhand des gebildeten Modells wird die Ableitung der konkreten Berechnungssystematik ermöglicht. Die Bewertungssystematik basiert auf der Gegenüberstellung des idealerweise mindestens erforderlichen Energiebedarfs zum tatsächlichen Energieverbrauch eines Prozesses. Die Basis zur Mindestenergiebedarfsberechnung auf Prozessebene bilden allgemeingültige physikalische, thermodynamische und chemische Gesetzmäßigkeiten.

Die Systematik zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs wird für die Fertigungsverfahren der DIN 8580 explizit dargestellt. Darüber hinaus wird ein Konzept zur Energieeffizienzbewertung einzelner Strukturen eines produzierenden Unternehmens dargestellt. Dieses Konzept ermöglicht auch die direkte Bewertung der Energieeffizienz der Herstellung eines Produkts.

Die entwickelte Berechnungssystematik zur Bestimmung des Mindestenergiebedarfs wird durch einen Trennversuch auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene verifiziert. Des Weiteren wird die Energieeffizienzbewertung ausgewählter Fertigungsverfahren der DIN 8580 experimentell dargestellt. Im Sinne einer Diskussion wird die Methode zur Bewertung der Relativen Energieeffizienz auf Basis des Mindestenergiebedarfs in der Produktion validiert. Neben dem Vergleich gegenüber Kennzahlen und Methoden zum heutigen Stand der Technik werden die Aussagekraft sowie die Anwendbarkeit und die dabei zu bewältigenden Herausforderungen im realen Produktionsumfeld beurteilt. Infolge dieser Erkenntnisse wird im Rahmen eines Ausblicks die operative Anwendung der Methode im betrieblichen Umfeld dargestellt. Deren bereichsübergreifende Potenziale für ein Unternehmen und einhergehende Herausforderungen werden abschließend diskutiert.

Die Energieeffizienzbewertung auf Basis des Mindestenergiebedarfs gestattet dank des unabhängigen Referenzbezugs prozess-, produkt-, unternehmens- und sogar branchenübergreifende Vergleiche. Somit leistet die Methode der Grundintention Folge, die Energieeffizienz eines Produkts hinsichtlich seiner Herstellung auf allen Ebenen mithilfe von Kennzahlen transparent und somit vergleichbar zu machen. Durch die Anwendung der Systematik werden konkrete Einsparpotenziale in der Prozesskette verursachergerecht transparent gemacht.

13 Summary

In light of the hitherto proposed withdrawal from nuclear energy in Germany the country is facing an ever-growing gap in its energy supply. Renewable energy sources are not yet able to close this gap and to ensure the security of supply. Therefore, immediate action is required in order to decrease the energy consumption as a sustainable pillar of the energy transition. Because of its substantial leverage effect the manufacturing industry carries great weight as an important driver of the energy consumption in Germany; its different industries have relative saving potentials of up to over 20%. [202] [7]

For the identification of highly efficient production structures a comparison is possible in order to derive specific saving potentials. The possibility of a meaningful evaluation and the comparison of energy efficiency hold the potential of increasing a company's success in terms of increase in turnover, market share and/or profit. [237] In order to gain the maximum use of the available potential it is important that the energy efficiency can be assessed, compared, and evaluated not only across product categories but also across industry sectors and enterprises. Only in this way it is possible to identify highly efficient production structures and specific saving potentials that can serve as a positive example and reference. Because there is no clear description of the state of the art in the presented analysis, a definition of energy efficiency is to be made. This approach is considered fundamental and serves as a basis to derive a system for evaluation. As a result, the defined relative energy efficiency gives information about the level of target achievement of the absolute energy efficiency and it allows a statement about the theoretically possible potential of energy savings.

The term energy efficiency will have to be defined clearly since, based on the presented analysis, as of yet no uniform description of the state of the art exists. This approach is considered fundamental and serves as a basis to derive a classification for its assessment. Consequently, the defined relative energy efficiency sheds light on the degree of achievement of the absolute energy efficiency and allows a statement concerning the theoretically possible potential for energy savings. The analysis of already existing methods and KPIs assist in identifying possible instruments for an overall comparison of energy efficiency: for this purpose, evaluation criteria are defined on the basis of fundamental requirements for a methodology to evaluate energy efficiency. Previously developed KPIs, TQM, Lean Management, and Six Sigma methods are analyzed with regard to their suitability for an energy efficiency benchmark; thus, KPIs and methods that prove to be suitable in principle will be re-conceptualized. According to the analysis individual methods and KPIs can be used for a comparison of energy efficiency only from specific perspectives. So far, however, there is no instrument for the overall assessment of the energy efficiency in the production, especially since no precise energetic reference points are being used or do not yet exist.

A cross-comparison of energy efficiency can only be achieved on the basis of a classification, stating a quantifiable and comparable quantity – since such a quantity does not yet exist, it has to be developed. Based on the approach, the Least Energy Demand (LED), a calculation method is deduced and described, which is then scaled to all levels of observation of a manufacturing company and projected on the product as such. Since a variety of different factors influence the energy consumption, the first step of the derivation of the calculation method is the detection and analysis of all these factors. In a second step, the interactions and dependencies of the detected influencing factors are illustrated in a model. Based on this model the derivation of a specific calculation system will be possible. The Least Energy Demand Method is based on the comparison of the theoretical minimal demand and the actual energy consumption of a process. The least energy demand calculation at the process level is based on universal physical, thermodynamic and chemical laws. The development of this method for calculating the relative energy efficiency is hereinafter represented at all levels of observation in a bottom-up approach.

A fractionize process is used to verify the developed method to determinate the LED. Within this framework, the derivation of the least energy demand calculation for selected manufacturing processes is shown analytically. The verification of this method takes place at the process level through the example of several forming and joining processes in the laboratory, under production conditions based on experimental test results.

The LED as reference for the evaluation of the actual energy efficiency in the production will be validated in terms of a discussion. In addition to the comparison of the method with respect to KPIs and methods concerning the current state of the art, its significance and applicability as well as the challenges to be faced in a real manufacturing environment are examined.

As a result of these findings, the operational application of the method in a corporate environment as well as its overarching potential for a company along with the necessities for its implementation is described in an outlook. Due to its independent comparison basis, the Least Energy Demand Method allows for process, product, company, and even cross-industry comparisons. Thus, by means of using KPIs on all levels of the manufacturing process, the method follows the basic intention of making the energy efficiency of a product transparent and ultimately comparable. In particular, the energy efficiency of a plant or a production process affects the energy-efficient manufacture of a product. It is this area specifically, as is revealed by the application of the method, which offers the biggest savings potentials and opportunities for optimization measures.

14 Abkürzungsverzeichnis

AV	Arbeitsvorbereitung
AZ	Arbeitszeit
C	consumed (=verbraucht) (<i>als Index</i>)
E	Systemenergie
E _M	an Materie gebundene Energie
E _A	Aktivierungsenergie
E-Modul	Elastizitätsmodul
EEE	Equipment Energy Effectiveness
EEl	Energieeffizienzindex
EG	Effizienzgrad
EI	Energieintensität
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnMS	Energiemanagementsystem
E _C	(Tatsächlicher) Energieverbrauch
E _{GM}	grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf
GM	grundoperationsspezifisch, mindest, (<i>als Index</i>)
GOP	Grundoperation
GPS	Geometrische Produktspezifikation
EPE	energetische Prozesseffizienz
E _{SM}	Mindestsystemenergieänderungsbedarf
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
G	Geometrie
GWh	Gigawattstunde
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KPI	Key Performance Indicator (Leistungskennzahl)
kWh	Kilowattstunde
LED	Least Energy Demand
l ₀	Gleichgewichtsabstand zwischen gebundenen Atomen
l _∞	Mindestabstand zwischen getrennten Atome
MEM	methods-energy measurement
NC	Numerical Control
OECD	Organization of Economic Co-operation and Development
OEE	Overall Equipment Effectiveness

P	Pose
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PE	Prozesseffizienz
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
QFD	Quality Function Deployment
REE	Relative Energieeffizienz
RPZ	Risikoprioritätszahl
SI	Internationales Einheitensystem
TQM	Total Quality Management
TZ	Thermodynamischer Zustand
TWh	Terawattstunde
Wh	Wattstunde
Ws	Wattsekunde
W	Werkstoffeigenschaften

15 Formelwertverzeichnis

A	Bruchdehnung
c	spezifische Wärmekapazität
d_0	Atomabstand
E_{kin}	kinetische Energie
E_{pot}	potentielle Energie
F	Kraft
f	Frequenz einer elektromagnetischen Welle
G	Schubmodul
H	Enthalpie
h	plancksche Wirkungsquantum
I_{yy}	Flächenträgheitsmoment
l_H	Hebelarm
m	Masse
ρ	technische Dichte
R	universelle Gaskonstante
R_m	Zugfestigkeit
p	Druck
P_n	Normaldruck
Q	Wärmemenge
Q_{el}	elektrische Ladung
q	spezifische Wärmekapazität zur Aggregatzustandsänderung
r_0	Atomabstand
s	Weg
σ_b	Biegefestigkeit
T	Temperatur
T_n	Normaltemperatur
τ	Fließspannung
U	innere Energie
U_0	Bindungsenergie
V	Volumen
v	Querkontraktionszahl
W	Arbeit
z	Randfaserabstand

Größen zur Berechnung der Relativen Energieeffizienz:

REE	Relative Energieeffizienz
E_C	Energieverbrauch
$E_{C, \text{Prozess}}$	Energieverbrauch für die Durchführung eines Prozesses
$E_{C, \text{Anlage}}$	Energieverbrauch einer Anlage
$E_{C, \text{Werk}}$	Energieverbrauch eines Werks
$E_{C, \text{Unternehmen}}$	Energieverbrauch eines Unternehmens
$E_{C, \text{Produkt}}$	Energieverbrauch zur Herstellung des Produkts
E_{CM}	gemessener Endenergieverbrauch an einer Maschine
$E_{CB, p}$	produktspezifisch gemessener Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen Energie
$E_{CB, g}$	global gemessener Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Betriebsstoffen
$E_{CN, p}$	produktspezifisch gemessener Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie
$E_{CN, g}$	global gemessener Endenergieverbrauch zur Erzeugung und Bereitstellung von Nutzenergie
p	produktspezifisch (<i>als Index</i>)
g	global (<i>als Index</i>)
E_{GM}	grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf
$E_{GM, \text{Prozess}}$	grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf für die Durchführung eines bestimmten Prozesses
$E_{GM, PK}$	grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf für die Durchführung einer bestimmten Prozesskette
$E_{GM, \text{Produkt}}$	grundoperationsspezifischer Mindestenergiebedarf für die Herstellung eines Produkts
E_{SM}	Mindestsystemenergieänderungsbedarf
PK	Prozesskette (<i>als Index</i>)
WK	Werk (<i>als Index</i>)
UN	Unternehmen (<i>als Index</i>)
M	produzierte Gesamtstückzahl aller Produkte
N_{Produkt}	Gesamtstückzahl der produzierten Erzeugnisse
Y	Yield

16 Literaturverzeichnis

- [1] ACKERMANN, T.: *Physikalische Biochemie. Grundlagen der physikalisch-chemischen Analyse biologischer Prozesse*. Springer-Verlag, Berlin, 1992
- [2] ADAC: *CO₂-Label, Energieverbrauchskennzeichnung für Pkw*.
URL <http://www.adac.de/infotestrat/umwelt-und-innovation/CO2-Label/default.aspx> - Überprüfungsdatum 2014-12-22
- [3] ADIDAS AG: *adidas Group Geschäftsbericht 2013*. Herzogenaurach, 2014
- [4] AGRICOLA, A.-C.; LINDLOFF, K.: *Auf dem Weg zum Standard*.
In: *Energiespektrum* 28, Nr. 1 2013, S. 24–25
- [5] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E.V.: *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012*. Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Projektnummer 23/11. Berlin, November 2013
- [6] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E.V.: *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland: 1990 bis 2013*. DIW Berlin; Energy Environment Forecast Analysis, Berlin, September 2014.
- [7] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E.V.: *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland: 1990 bis 2014*
DIW Berlin; Energy Environment Forecast Analysis, Berlin, August 2015
- [8] BAEHR, H. D.; KABELAC, S.: *Thermodynamik, Grundlagen und technische Anwendungen*. 15. Aufl., Springer Vieweg Verlag, Berlin Heidelberg, 2012
- [9] BARGEL, H.-J.; SCHULZE, G.: *Werkstoffkunde*.
11. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 2012
- [10] BARTHELMES, H.: *Handbuch Industrial Engineering. Vom Markt zum Produkt*. Hanser Verlag, München, 2013
- [11] BASF SE: *BASF Bericht 2013. Ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Leistung*. Ludwigshafen, 2014.
- [12] BAUER, U.: *Kennzahlensysteme im betrieblichen Energiemanagement*.
Dissertation an der Technischen Universität Graz,
Fakultät für Maschinenbau, Graz, 1988
- [13] BAYER AG: *Geschäftsbericht 2013*. Leverkusen, 2014
- [14] BECKER, T.: *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*.
2., neubearb. und erw. Aufl., Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 2008
- [15] BEITZ, W.; GROTHE, K.-H.: *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*.
20. Aufl., Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 2001
- [16] BERGLER, F.: *Physikalische Chemie*.
1. Aufl., Wiley-VCH-Verlag, Weinheim, 2013
- [17] BERTSCH, L. H.: *Yield Management*, S. 2257-2270, in Kern, W.; Schröder, H.H.; Weber, J. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*.
2. Auflage, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1996
- [18] BICHLER, K.; KROHN, R.; PHILIPPI, P.: *Gabler-Kompakt-Lexikon Logistik, 1800 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden*.
1. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2005.

- [19] BIESALSKY & COMPANY; FACIT RESEARCH: *Wertschöpfungsreport Nachhaltigkeit 2014*. Biesalsky & Company, München, 2014
- [20] BIESE, V.; BLEYER, U.; BOSSE, M.: *Chemie, Grundlagen, Anwendungen, Versuche*. 2. Aufl., Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1990
- [21] BLES, M.; KESSLER, A.: *Energieeffizienz in der Industrie*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013
- [22] BLUNCK, R.: *Maßsysteme, Naturkonstanten und Grenzen des physikalischen Universums : die Physik als Lehre von der Wechselwirkung der Körper durch Kräfte in Raum und Zeit und das daraus resultierende Kraft- Zeit- Maßsystem in seiner Bedeutung für Physik und Technik*. Lempelius Verlag, Bad Nauheim, 1956
- [23] BÖGE, A.: *Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. 22. Aufl., Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2015
- [24] BÖHNERT, A. A.: *Benchmarking. Charakteristik eines aktuellen Management-instruments*. Schriftenreihe innovative betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis 93, Kovac, Hamburg, 1999
- [25] BORNSCHLEGEL, M.; PAULUS, I.; BREGULLA, M.: *Von der Energie zur Kennzahl – Die Kennzahlenentwicklungskette*. In: Automobiltechnische Zeitschrift ATZ, 05/2013, S. 418-423
- [26] BORNSCHLEGL, M.; PARYANTO; SPAHR, M.; KREITLEIN, S.; BREGULLA, M.; FRANKE, J.: *Energy Planning of Manufacturing Systems with Methods-Energy Measurement (MEM) and Multi-Domain Simulation Approach*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 655, Green Factory Bavaria Colloquium 2014, Nuremberg, 2014
- [27] BORNSCHLEGL, M.; SPRENG, S.; KREITLEIN, S.; BREGULLA, M.; FRANKE, J.: *Determination of the prospective energy consumption of manufacturing technologies with methods-energy measurement (MEM)*. E|DPC Conference 2014, IEEE, Nuremberg 2014
- [28] BRATZEL, S.: *Innovationen in der Automobilindustrie*. Shaker, Aachen, 2005
- [29] BROWN, T. L.; BURSTEN, B. E.; LEMAY, H. E.: *Chemie, Die zentrale Wissenschaft*. 10. Aufl., Pearson Studium, München, 2007
- [30] BRÜCKNER, C.: *Qualitätsmanagement. Das Praxishandbuch für die Automobilindustrie*. Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [31] BRÜGGEMANN, H.; BREMER, P.: *Grundlagen Qualitätsmanagement: Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM*. Vieweg +Teubner, Wiesbaden, 2012
- [32] BRUNNER, F. J.; WAGNER, K. W.: *Taschenbuch Qualitätsmanagement. Leitfaden für Studium und Praxis*. Praxisreihe Qualitätswissen, 5. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [33] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Energiedaten: Gesamtausgabe: Stand: November 2014*. Berlin, November 2014
- [34] BURGERT, I.: *Skript Werkstoffeigenschaften*. Institute for Building Materials, ETH Zürich, Zürich, 2010
- [35] CANTNER, U.; KRÜGER, J.; HANUSCH, H.: *Produktivitäts- und Effizienzanalyse. Der nichtparametrische Ansatz*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [36] CASSING, W. (ET. AL.): *Dauermagnete, Mess- und Magnetisieretechnik*. Expert Verlag, Renningen, 2007

- [37] CONTINENTAL AG: *Ihre Mobilität. Ihre Freiheit. Unsere Handschrift.* Geschäftsbericht 2013, Hannover, 2014
- [38] CRASTAN, V.; WESTERMANN, D.: *Elektrische Energieversorgung 2.: Kraftwerktechnik und alternative Stromversorgung, chemische Energiespeicherung.* Springer Verlag, Berlin, 2012
- [39] DAUM, A.; GREIFE, W.; PRZYWARA, R.: *BWL für Ingenieure und Ingenieurinnen: Was man über Betriebswirtschaft wissen sollte.* Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2010
- [40] DBZ - DEUTSCHES BENCHMARKING ZENTRUM: *Definition: Benchmark/-ing.* URL <http://www.benchmarkingforum.de/benchmarking-definition.html> - Überprüfungsdatum 2013-12-11
- [41] DENA: *Das EU-Label für Elektrogeräte – Informationen für Einzelhandel und Handwerk.* URL http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Presse/Pressemappen/stromeffizienz/Broschuere_EU-Label_fuer_Elektrogeraete.pdf Überprüfungsdatum 2013-11-27
- [42] DIETRICH, E.; SCHULZE, A.; WEBER, S.: *Kennzahlensystem für die Qualitätsbeurteilung in der industriellen Produktion.* Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [43] DIHK - DEUTSCHER INDUSTRIE- UND HANDELSKAMMERTAG BERLIN | BRÜSSEL: *Faktenpapier Strompreise in Deutschland 2016.* DIHK Berlin, 2016
- [44] DIN 1343: 1990-01: *Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe und Werte.* Beuth Verlag, Berlin, 1990
- [45] DIN 50125, Juli 2009, *DIN 50125 – Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben.* Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [46] DIN 8580: 2003-09: *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.* Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [47] DIN 8593-0: 2003-09: *Fertigungsverfahren Fügen. Teil 0: Allgemeines, Einordnung, Unterteilung, Begriffe.* Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [48] DIN 8593-5: 2003-09: *Fertigungsverfahren Fügen. Teil 5: Fügen durch Umformen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe.* Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [49] DIN EN 16212: 2012-09: *Energieeffizienz- und -einsparberechnung - Top-Down- und Bottom-Up-Methoden.* Deutsche Fassung EN 16212:2012
- [50] DIN EN 16231: 2012-09: *Energieeffizienz-Benchmarking-Methodik.* Deutsche Fassung EN 16231:2012
- [51] DIN EN ISO 12100: 2011-03: *Sicherheit von Maschinen.* Deutsche Fassung EN ISO 12100:2010
- [52] DIN EN ISO 1302: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS)- Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation.* . Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [53] DIN EN ISO 14031: 2013-12: *Umweltmanagement - Umweltleistungsbewertung - Leitlinien.*
- [54] DIN EN ISO 50001: 2011-12: *Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung.* Deutsche Fassung EN ISO 50001:2011
- [55] DIN EN ISO 9000: 2005-12: *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe.*

- [56] DIN ISO 8015: *Technische Zeichnungen. Tolerierungsgrundsatz*. Beuth Verlag, Berlin, 1986
- [57] DIN V 18599: 2013-05: *Energetische Bewertung von Gebäuden*. Beuth Verlag, Berlin, 2013
- [58] DOBROSCHKE, A.: *Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte*. Band 219. In: J. Franke, M. Geiger, M. Merklein, M. Schmidt: *Fertigungstechnik* - Erlangen. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2011
- [59] DOEGE, E.; BEHRENS, B.-A.: *Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- [60] DRATWA, F. A.; EBERS, M.; POHL, A. K.; SPIEGEL, B.; STRAUCH, G.: *Energiewirtschaft in Europa: Im Spannungsfeld zwischen Klimapolitik, Wettbewerb und Versorgungssicherheit*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010
- [61] DRENKELFORT, G.; PRÖHL, T.; EREK, K.: *Energiemonitoring von IKT-Systemen. Kennzahlen*. Universitätsverlag der TU Berlin, Berlin, 2013
- [62] DRUMMER, D.: *Skript Kunststoffverarbeitung*. Lehrstuhl für Kunststofftechnik, FAU Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2012
- [63] ECKSTEIN, O.; KREITLEIN, S.; FRANKE, J.: *Entwicklung eines Softwaretools zur Ermittlung von Energieeffizienzkennzahlen bei der technischen Leistungserstellung*. FAU, Erlangen- Nürnberg, 2014 – Masterarbeit
- [64] EDER, N.; KREITLEIN, S.; FRANKE, J.: *Analyse, Neukonzeptionierung und Verifizierung von Methoden zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion am Beispiel der Elektronikproduktion im Rahmen des Forschungsprojektes E|Benchmark – Green Factory Bavaria*. FAU, Erlangen- Nürnberg, 2014 - Projektarbeit
- [65] EIBL, T.: *Blechmodellierung mit CATIA V5 : Effizientes Konstruieren von Blechbiegeteilen*. Wiesbaden, s.l. : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013
- [66] ENGELHARD, J.: *Stichwort: Branche*. In: Springer Gabler Verlag (Hrsg.), Gabler Wirtschaftslexikon, URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/1210/branche-v9.html> - Überprüfungsdatum 2015-05-30
- [67] ERLACH, K.; WESTKÄMPFER, E.: *Energiewertstrom. Der Weg zur energieeffizienten Fabrik*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2009
- [68] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Richtlinie 2006/32/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen und zur Aufhebung der Richtlinie 93/76/EWG des Rates*. 2006
- [69] EUROPÄISCHE-KOMMISSION: *DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) Nr. 1062/2010 DER KOMMISSION vom 28. September 2010 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Kennzeichnung von Fernsehgeräten in Bezug auf den Energieverbrauch*. Brüssel, 2010
- [70] EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE-GENERAL ENERGY AND TRANSPORT, AND FRAUNHOFER-INSTITUTE FOR SYSTEMS AND INNOVATION RESEARCH ET AL.: *Data*

- Base on Energy Saving Potentials, Query.* URL <http://www.eepotential.eu/potentials.php> - Überprüfungsdatum 2015-01-08
- [71] EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE-GENERAL ENERGY AND TRANSPORT; FRAUNHOFER-INSTITUTE FOR SYSTEMS AND INNOVATION RESEARCH; ENERDATA; INSTITUTE OF STUDIES FOR THE INTEGRATION OF SYSTEMS ISIS; TECHNICAL UNIVERSITY VIENNA; WUPPERTAL INSTITUTE FOR CLIMATE, ENVIRONMENT AND ENERGY WI: *Study on the Energy Savings Potentials in EU Member States, Candidate Countries and EEA Countries: Final Report. EC Service Contract Number TREN/D1/239-2006/S07.66640.* Karlsruhe, Grenoble, Rome, Vienna, Wuppertal, März 2009
- [72] FALK, G.; RUPPEL, W.: *Energie und Entropie: Die Physik des Naturwissenschaftlers.* Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 1976.
- [73] FELDMANN, K.; SCHÖPPNER, V.; SPUR, G.: *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren.* Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [74] FINKELNBURG, W.: *Einführung in die Atomphysik.* Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1954
- [75] FISCHER, U.; GOMERINGER, R.; HEINZLER, M.; KILGUS, R.; NÄHER, F.; OESTERLE, S.; PAETZOLD, H.; STEPHAN, A.: *Tabellenbuch Metall.* 44. Aufl., Europa-Lehrmittel Verlag, 2008
- [76] FISCHER, U.; HEINZLER, M.; NÄHER, F.; U.A.: *Tabellenbuch Metall.* 45. Auflage. Verlag Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten 2011
- [77] FLEITER, T.; SCHLOMANN, B.; EICHHAMMER, W.: *Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente.* Fraunhofer Verlag, Stuttgart 2013
- [78] FÖLL, H.: *Skript Einführung in die Materialwissenschaft I.* Lehrstuhl für Allgemeine Materialwissenschaft, Christian-Albrechts-Universität Kiel, 2014
- [79] FRANKE, J.: *Vorlesungsskript PRIDE – Produktionsprozesse in der Elektronik. Vorlesung 7: Materialfluss in der Elektronikfertigung.* Universität Erlangen-Nürnberg, 2013
- [80] FRANKE, J.; KREITLEIN, S.: *Green Factory Kolloquium: Tagungsband zum 1. Green Factory Bavaria Kolloquium 2014 Energieeffiziente Produktion.* Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, 2014
- [81] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG: *Erstellung von Anwendungsbilanzen für das Jahr 2012 für das verarbeitende Gewerbe mit Aktualisierungen für die Jahre 2009-2011: Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) - Entwurf.* Karlsruhe, November 2013
- [82] FRAUNHOFER-INSTITUT IPA: *Energieeffizienz-Index der deutschen Industrie: Erste Auswertung zum 20.12.2013.* Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Dezember 2013
- [83] FRONDEL, M.; GROSCHE, P.; HUCHTEMANN, D.; OBERHEITMANN, A.; PETERS, J.; VANCE, C.; ANGERER, G.; SARTORIUS, C.; BUCHHOLZ, P.; ROHLING, S.; WAGNER, M.: *Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen.* Essen: RMI, 2007

- [84] GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Effektivität. Definition.*
URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/7639/effektivitaet-v9.html> -
Überprüfungsdatum 2014-10-26
- [85] GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Effizienz. Definition.*
URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/7640/effizienz-v14.html> -
Überprüfungsdatum 2014-10-14
- [86] GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Ökonomisches Prinzip. Definition.*
URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/8349/wirtschaftlichkeitsprinzip-v5.html> - Überprüfungsdatum 2014-10-26
- [87] GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Produktivität. Definition.*
URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55467/produktivitaet-v6.html> -
Überprüfungsdatum 2014-10-26
- [88] GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Rentabilität. Definition.*
URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/798/rentabilitaet-v13.html> -
Überprüfungsdatum 2014-10-26
- [89] GAUCKLER, L. J.: *Skript Materialwissenschaft I Keramik.* Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Department of Materials, ETH Zürich, 2005
- [90] GEIGER, W.: *QZ – Qualität und Zuverlässigkeit.*
Ausgabe QZ 11/2003, S. 1067, Carl Hanser Verlag, München, 2003
- [91] GERTHSEN, T.: *Chemie für den Maschinenbau 2.*
Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2008
- [92] GLEICH, R.: *Nachhaltigkeitscontrolling. Konzepte, Instrumente und Fallbeispiele zur Umsetzung.* Haufe, Freiburg, München, 2012
- [93] GRÄFEN, H.: *Lexikon Werkstofftechnik.* VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991
- [94] GROSS, D.; HAUGER, W.; WRIGGERS, P.: *Technische Mechanik 4. Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden.*
9. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 2014
- [95] HAAG, H.: *Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion.*
Band 11. In: T. Bauernhansl, A. Verl, E. Westkämpfer: *Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung.* Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2013
- [96] HAHNE, E.: *Technische Thermodynamik, Einführung und Anwendung.*
5. Aufl., Oldenbourg Verlag, München, 2010
- [97] HAMMER, A.; HAMMER, H.; HAMMER, K.: *Physikalische Formeln und Tabellen.*
8. Aufl., Lindauer Verlag, München, 2008
- [98] HANENKAMP, N.: *The Process Model for Shopfloor Management.* In: *Advances in Industrial Engineering and Management*, Vol. 2 No1, 2013, pp. 40-46
- [99] HARIC, P.: *Stichwort: Unternehmen.*
In: Springer Gabler Verlag (Hrsg.), *Gabler Wirtschaftslexikon*,
URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/2942/unternehmen-v11.html>
Überprüfungsdatum 2015-05-30
- [100] HEEG, F.-J.: *Projektmanagement: Grundlagen der Planung und Steuerung von betrieblichen Problemlöseprozessen.*
2. Auflage, München, Wien: Hanser, 1993
- [101] HEINDL, H.: *Benchmarking Best Practices.* Arbeitspapiere des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaft 191, Wuppertal, 1999

- [102] HEINLOTH, K.: *Energie: Physikalische Grundlagen ihrer Gewinnung, Umwandlung und Nutzung*. Teubner Studienbücher Physik, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1983
- [103] HESSELBACH, J.: *Energie- und klimateffiziente Produktion. Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
- [104] HIERSIG, H. M.: *Lexikon Produktionstechnik, Verfahrenstechnik*. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1995
- [105] HIRZEL, S.; ET. AL.: *Herausforderungen und Umsetzungen in der Praxis*. White Paper, Karlsruhe, September 2013
- [106] HOFFMANN, J.: *Taschenbuch der Messtechnik*. 6. Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- [107] HOFMANN, P.; KRIEGER-HAUWEDE, M.: *Einführung in die Festkörperphysik*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2013
- [108] HOLLIG, H.; GEDIGA, G.: *Statistik – Deskriptive Verfahren*. Hogrefe Verlag, Göttingen, 2011
- [109] HORT, N.: *Einführung in Werkstoffkunde Herstellung, Eigenschaften, Be- und Verarbeitung Keramik und Glas*. Vorlesungsskript GKSS Forschungszentrum, Helmholtz Gemeinschaft, Geesthacht, 2014
- [110] HOSSDORF, H. (ET. AL.): *Das Erlebnis Ingenieur zu sein*. Springer Verlag, Basel, 2003
- [111] ILSCHNER, B.; SINGER, R. F.: *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik. Eigenschaften, Vorgänge, Technologien*. 5. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 2010
- [112] INGENIEUR-BÜRO MATTHAEI: *Energieausweis Nicht-Wohngebäude*. URL <http://files.energie-effizient-sparen.de/uploads/2012/12/energieausweis-nichtwohngbaeude.jpg> - Überprüfungsdatum 2014-10-29
- [113] JENTSCH, C.: *Angewandte Chemie für Ingenieure*. : BI-Wissenschafts-Verlag, Mannheim, Wien, Zürich, 1990
- [114] KALWEIT, A.; PAUL, C.; PETERS, S.; WALLBAUM, R.: *Handbuch für technisches Produktdesign – Material und Fertigung*. 2. bearb. Aufl., Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 2012
- [115] KAMISKE, G. F.; BRAUER, J. P.: *ABC des Qualitätsmanagements*. Pocket Power. 4. Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 2012
- [116] KARL, F.; SCHNELLBACH, P.; REINHART, G.; BÖHNER, J.; FREIBERGER, S.; STEINHILPER, R.; KREITLEIN, S.; FRANKE, J.; MAIER, T.; POHL, J.; ZÄH, M. F.: *Green Factory Bavaria: Demonstrations-, Lehr- und Forschungsplattform zur Erhöhung der Energieeffizienz*. wt Werkstattstechnik online, vol. 102, no. 9, pp. 629–632, 2012
- [117] KELLER, F.; KLIMM, B.; OSTERFELD, H.: *MES-Kennzahlen. Erweiterung des OEE um den Faktor Energie*. Fraunhofer IWU, München, 2014
- [118] KLEINJANS, D.-I. M.; KRÖHNERT, K.; KOTSCHENREUTHER, D.-I. J.: *EEE – Die Formel zur Messung der Energieeffizienz. Karlsruhe*. URL <http://www.pressebox.de/pressemitteilung/kroehnert-infotecs-gmbh/EEE-Die-Formel-zur-Messung-der-Energieeffizienz/boxid/568356> - Überprüfungsdatum 2013-10-20

- [119] KOLBE, M.; HELLWIG, W.: *Spanlose Fertigung Stanzen : Präzisionsstanzteile, Hochleistungswerkzeuge, Hochgeschwindigkeitspressen*. 11., überarb. u. erw. Aufl. 2015, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- [120] KOLLER, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau: Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen*. 4., neubearb. und erw. Aufl., Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 1998
- [121] KREIMEIER, D.: *Ressourcenorientierte Bewertung und Optimierung von Prozessketten. Verbundprojekt im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)*. VDMA-Verl, Frankfurt am Main, 2012
- [122] KREITLEIN, S.: *E|Benchmark - Ansatz zur übergreifenden Bewertung und Bemessung der Energieeffizienz in der Produktion*. In: Tagungsband zum 2. GFB Kolloquium 2015, Nürnberg, ISBN: 978-3-00-050523-2, 2015
- [123] KREITLEIN, S.; EDER, N.; SYED-KHAJA, A.; FRANKE, J.: *Comprehensive Assessment of Energy Efficiency Within the Production Process*. WASET, ICSM, XIII International Conference on Sustainable Manufacturing, Zurich 2015
- [124] KREITLEIN, S.; FRANKE, J.; ET AL.: *Analyse und Weiterentwicklung von Kennzahlen und Methoden zur Bewertung der Energieeffizienz*. Online unter www.researchgate.net, 2015, URL https://www.researchgate.net/publication/302026450_Analyse_und_Weiterentwicklung_von_Kennzahlen_und_Methode_n_zur_Bewertung_der_Energieeffizienz?channel=doi&linkId=572dacb608aeed22975a3b92&showFulltext=true, Überprüfungsdatum 2016-05-07
- [125] KREITLEIN, S.; FRANKE, J.; HASHANI, X.: *Unternehmensumfrage zur Bedarfsermittlung für die Entwicklung eines Energieeffizienz-Benchmarks mittels Kennzahlen und Methoden*. Online unter www.researchgate.net, 2015, URL <https://www.researchgate.net/publication/277307524?channel=doi&linkId=5566c54b08aec22682ff212b&showFulltext=true> - Überprüfungsdatum 2015-05-30
- [126] KREITLEIN, S.; HOFMANN, B.; MEYER, A.; SPRENG, S.; KUEHL, A.; FRANKE, J.: *Strategies and Methods for the Energy Efficient Production of Electric Drives*. CIRP, LCE, 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Berlin 2016
- [127] KREITLEIN, S.; KUPFER, I.; BRANDMEIER, M.; FRANKE, J.: *The Least Energy Demand Method as Metric to Evaluate Different Production Levels based on the Relative Energy Efficiency*. In: Franke, J.; Kreitlein, S. (Hrsg.): *Green Factory Bavaria Colloquium 2015, Applied Mechanics and Materials Vol 805*, Trans Tech Publications, Switzerland, 2015
- [128] KREITLEIN, S.; KUPFER, I.; BRANDMEIER, M.; FRANKE, J.: *The Least Energy Demand Method as Metric to Evaluate Different Production Levels based on the Relative Energy Efficiency*. *Applied Mechanics and Materials Vol. 805, Green Factory Bavaria Colloquium 2015, Nuremberg*, 2015
- [129] KREITLEIN, S.; KUPFER, I.; MÜHLBAUER, M.; FRANKE, J.: *The Relative Energy Efficiency as Standard for Evaluating the Energy Efficiency of Production Processes based on the Least Energy Demand*. In: Franke, J.; Kreitlein, S. (Hrsg.): *Green Factory Bavaria Colloquium 2015, Applied Mechanics and Materials Vol 805, Trans Tech Publications, Switzerland*, 2015

- [130] KREITLEIN, S.; KUPFER, I.; SCHOLZ, M.; FRANKE, J.: *The Least Energy Demand Method as Metric to Describe the Relative Energy Efficiency of a Product based on its Manufacturing*. In: Franke, J.; Kreitlein, S. (Hrsg.): Green Factory Bavaria Colloquium 2015, Applied Mechanics and Materials Vol 805, Trans Tech Publications, Switzerland, 2015
- [131] KREITLEIN, S.; KUPFER, I.; SCHOLZ, M.; FRANKE, J.: *The Least Energy Demand Method as Metric to Describe the Relative Energy Efficiency of a Product Based on its Manufacturing*. In: AMM 805, S. 19–24. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.805.19, GFB Colloquium 2015, Nürnberg, ttp-Verlag Zürich, ISBN-13: 978-3-03835-646-2, 2015
- [132] KREITLEIN, S.; MEYER, A.; FRANKE, J.: *E|Benchmark - a pioneering method for process planning and sustainable manufacturing strategies for processes in the electric drives production*. IEEE, E|DPC Electric Drives Production Conference, Nuremberg, 2014
- [133] KREITLEIN, S.; RACKOW, T.; FRANKE, J.: *E|Benchmark - Approaches and methods for assessing the energy efficiency of the industrial automated product manufacturing*. Green Factory Bavaria 2014, Green Factory Bavaria Colloquium 2014, Nuremberg, 2014
- [134] KREITLEIN, S.; RACKOW, T.; FRANKE, J.: *Energy KPI's, challenges for sustainable manufacturing strategies, analysis of existing rules and indicators in an industrial environment in relation to the establishment of energy benchmark*. WGP, WGP-Congress Erlangen, 2014
- [135] KREITLEIN, S.; SCHWENDER, S.; RACKOW, T.; FRANKE, J.: *E|Benchmark - a pioneering method for energy efficient process planning and assessment along the life cycle process*. CIRP, LCE, 22nd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Sydney 2015
- [136] KREITLEIN, S.; SPRENG, S.; FRANKE, J.: *E|Benchmark - a pioneering method for process planning and sustainable manufacturing strategies*. CIRP, 12th GSCM, Global Conference on Sustainable Manufacturing, Malaysia, 2014
- [137] KREITLEIN, S.; ULTSCH, F.; BAUMHOER, F.; FRANKE, J.: *The Least Energy Demand Method, a tool for Evaluation and Cross-Assessment of the Energy Efficiency in the Production*. Conference Proceedings: International Symposium on Green Manufacturing and Application, Bali, Indonesia, 2016
- [138] KRIEGER, W.: *Stichwort: Stückgut*. In: Springer Gabler Verlag (Hrsg.), Gabler Wirtschaftslexikon. URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/83495/stueckgut-v7.html>-Überprüfungsdatum 2016-05-01
- [139] KRINGS, R.: *Bewertung und kontinuierliche Verbesserung der Ressourceneffizienz von automatisierten Fertigungssystemen*. Shaker, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme, Band 2012,10, Aachen, 2012
- [140] KÜNNE, B.: *Köhler/Rögnitz Maschinenteile 1*. 18. Auflage. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2007
- [141] KURTZ, A.: *Factbook Einzelhandel 2012: Daten, Fakten, Trends, Perspektiven, Kommunikation*. LPV Lebensmittel Praxis Verlag, Neuwied, 2011
- [142] KURZWEIL, P.; SCHEIPERS, P.: *Chemie, Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*. 9. Aufl., Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012

- [143] KÜTING, K.; WEBER, C.-P.: *Die Bilanzanalyse – Beurteilung von Abschlüssen nach HGB und IFRS*. 10. Auflage. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2012
- [144] LANGE, K. (HRSG.): *Blechbearbeitung*. 2., völlig Neubearb. und erw. Aufl. (*Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft / hrsg. von Kurt Lange ; Bd. 3*). Springer Verlag, Berlin 1990
- [145] LASCO: *Umformtechnik: Wirkungsgrad jenseits 90%*. In: *Umformtechnik* 03/2011, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2011
- [146] LAYER, G.; MATULA, F.; SALLER, A.; RAHN, R.: *Ermittlung von Energiekennzahlen für Anlagen, Herstellungsverfahren und Erzeugnisse*. Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 1999
- [147] LEIPERTZ, A.: *Technische Thermodynamik*. ESYTEC Energie- und Systemtechnik GmbH, Erlangen 2011
- [148] LEVEN, B.: *Energiemanagement in der Investitionsgüterindustrie. Energieverbrauchsstruktur, Energiekennwerte und rationelle Energieanwendung am Beispiel der Automobilindustrie*. Mensch-und-Buch-Verlag, Berlin, 2005
- [149] LINß, G.: *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. 3. Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [150] LÖFFLER, T.: *Energiekennzahlen für Betriebsvergleiche*. Technische Universität Chemnitz, Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb, Chemnitz, 2011
- [151] LÖHNER, K.; MÜLLER, H.: *Gemischbildung und Verbrennung im Ottomotor*. Springer Verlag, Wien, 1967
- [152] LUCAS, K.: *Thermodynamik – Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen*. 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 2000
- [153] LUCAS, K.: *Thermodynamik, Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen*. 6. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 2007
- [154] LUNAU, S.: *Six Sigma+Lean Toolset*. 3. Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012
- [155] MARKL, G.: *Minerale und Gesteine. Mineralogie - Petrologie – Geochemie*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum; 2015
- [156] MARX GOMEZ, J.; LANG, C.; WOHLGEMUTH, V.: *IT-gestütztes Ressourcen- und Energiemanagement*. Springer+Vieweg Verlag, Berlin, 2013
- [157] MASCHINENBAU-FH.DE: *Abbildungen elementare Gitterstrukturen Metall*. URL http://www.maschinenbau-fh.de/wst_gitter.html - Überprüfungsdatum 2015-12-19
- [158] MATTES, K.; SCHRÖTER, M.: *Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Bewertung der wirtschaftlichen Potenziale von energieeffizienten Anlagen und Maschinen*. Kurzstudie, Karlsruhe, August 2011
- [159] MATTHES, K.-J.; RIEDEL, F.: *Fügetechnik. Überblick – Löten – Kleben – Fügen durch Umformen*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2003
- [160] MEIER, H.; HANENKAMP, N.: *Komplexitätsmanagement in der Supply Chain*. In: Dangelmaier, Wilhelm; Busch, Axel (Hrsg.): *Integriertes Supply-chain-Management : Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse*. Gabler, Wiesbaden, 2002, S. 111-130

- [161] MEIER, H.; HANENKAMP, N.: *Modellierung und Planung komplexer Produktionssysteme*. In: Industrie-Management, Ausgabe 19, 2003, H. 5, S. 50-53
- [162] MEIER, H.; HANENKAMP, N.: *Prozessorientiertes Variantenmanagement für KMUs*. In: PPS-Management, 8. 2003, H. 4, S. 62-64, ISSN 1434-2308
- [163] MORTIMER, C. E.; BECK, J.; MÜLLER, U.: *Chemie. Das Basiswissen der Chemie*. 12. Aufl., Thieme Verlag, Stuttgart, 2015
- [164] MUCH, W.; ET AL.: *Wicklungen und Montage rotierender elektrischer Maschinen*. 3. Auflage, Richard Pflaum Verlag, München, 1983
- [165] MÜHL, T.: *Einführung in die Elektrische Messtechnik*. 3. Auflage. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2008
- [166] MÜHLBAUER, M.; KREITL, S.; FRANKE, J.: *Entwicklung von Ansätzen zur Beurteilung der Energieeffizienz bei der technischen Leistungserstellung*. FAU, Erlangen- Nürnberg, 2013 - Masterarbeit
- [167] MÜLLER, E.; ENGELMANN, J.; LÖFFLER, T.; STRAUCH, J.: *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013
- [168] MÜLLER, E.; LÖFFLER, T.: *Energiekennzahlen für Industrie und produzierendes Gewerbe*. In: H. Biedermann: Umweltverträgliche Produktion und nachhaltiger Erfolg. Chancen, Benchmarks & Entwicklungslinien. Rainer Hampp Verlag, München, Mering, 2011, S. 121–135.
- [169] N. N.: *Das neue EU-Energielabel: Informationen für den Handel*. URL <http://www.newenergylabel.com/index.php/de/home/> - Überprüfungsdatum 2014-01-12
- [170] N. N.: *Giess-Technische-Sonderkeramik – Datenblatt AL99-G (99,7% Al₂O₃)*. GTS GmbH & Co. KG, Düsseldorf, 2015
- [171] N. N.; DEUTSCHEHANDWERKSZEITUNG: *Nachhaltigkeit ist wichtiges Verkaufsargument*. 10.01.2013. URL <http://www.deutsche-handwerkszeitung.de/nachhaltigkeit-ist-wichtiges-verkaufsargument/150/3100/196970> Überprüfungsdatum 2015-01-24
- [172] N. N.; KPI LIBRARY: *Electrical Energy Efficiency ratio*. URL <http://kpilibrary.com/kpis/electrical-energy-efficiency-ratio-2> - Überprüfungsdatum 2014-08-21
- [173] N. N.; STROMEFFIZIENZ: *Das EU-Energielabel*. URL <http://www.stromeffizienz.de/haendler-berater/energieverbrauchs-kennzeichnung/das-eu-energielabel.html> - Überprüfungsdatum 2013-11-27
- [174] N. N.; STROMEFFIZIENZ: *Weitere Energie- und Umweltsiegel*. URL <http://www.stromeffizienz.de/haendler-berater/energieverbrauchs-kennzeichnung/weitere-energie-und-umweltsiegel.html> - Überprüfungsdatum 2013-11-27
- [175] N. N.; WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Kennzahlenarten*. URL <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/kennzahlenarten/kennzahlenarten.htm> - Überprüfungsdatum 2014-09-24
- [176] N. N.; DUDEN ONLINE: *Operation. Definition*. URL <http://www.duden.de/node/644631/revisions/1340478/view> Überprüfungsdatum 2015-09-01

- [177] N.N.: *Aachen hat Energie: Grundbegriffe zur Energie. Energieformen.*
URL <http://www.aachen-hat-energie.de/entw/energieformen.htm> -
Überprüfungsdatum 2014-12-22
- [178] N.N.; CHEMIE.DE: *Potentialtopf.*
URL <http://www.chemie.de/lexikon/Potentialtopf.html>
Überprüfungsdatum 2015-12-03
- [179] N.N.; SPEKTRUM.DE – LEXIKON DER PHYSIK: *Valenzelektronen.*
URL <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/valenzelektronen/15056>
Überprüfungsdatum 2015-12-03
- [180] N.N.; WEBELEMENTS.COM: *Oxygen: radii of atoms and ions.*
URL http://www.webelements.com/oxygen/atom_sizes.html
Überprüfungsdatum 2015-12-03
- [181] NEUGEBAUER, R. (HRSG.): *Handbuch Ressourcenorientierte Produktion.*
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2014
- [182] NEUGEBAUER, R.: *Kongress Nachhaltige Produktion.*
Tagungsband. Auerbach /Vogtland. Wissenschaftliche Skripten, 2011
- [183] NEUMANN, F.: *100 Energiekennzahlen.* Cometis, Wiesbaden, 2010
- [184] ÖKOTEC ENERGIEMANAGEMENT GMBH: *Energieeffizienz in der Industrie.*
Studie, Prognos, München, Juli 2012
- [185] OKRUSCH, M.; MATTHES, S.: *Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde.*
7. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2005
- [186] PEHNT, M. U.A.: *Energieeffizienz: Potenziale, volkswirtschaftliche Effekte und innovative Handlungs- und Förderfelder für die Nationale Klimaschutzinitiative, Endbericht.* IFEU, Fraunhofer ISI, Prognos, GWS u.a., Heidelberg, Karlsruhe, Berlin, Osnabrück, Freiburg, Oktober 2011
- [187] PEHNT, M.: *Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch.*
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- [188] PERLWITZ, S.; KREITLEIN, S.; FRANKE, J.: *Entwicklung einer softwaregestützten Lösung zur Bewertung und Visualisierung der Energieeffizienz in der Produktion als Applikation im Rahmen des Projekts E|Benchmark.*
FAU, Erlangen- Nürnberg, 2015 - Masterarbeit
- [189] PFEIFFER, F.: *Chemie kompakt Wissen.*
1. Aufl., Klett Verlag, Stuttgart, 2013
- [190] PFENNIG, A.: *Thermodynamik der Gemische.*
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004
- [191] POMPE, W.; SCHAT, W.; WORCH, H.: *Werkstoffwissenschaft.*
10. Aufl., Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2011
- [192] PORTER, M. E.: *Competitive strategy: Techniques for analyzing industries and competitors.* Free Press, New York, 1980
- [193] REICHMANN, T.: *Controlling mit Kennzahlen und Managementberichten.*
5. Auflage. Vahlen, München, 1997
- [194] ROEREN, S.: *Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse.*
Utz Verlag, München, 2007

- [195] ROOS, E.; MAILE, K.: *Werkstoffkunde für Ingenieure – Grundlagen, Anwendungen, Prüfungen*. 5. Auflage, Springer-Vieweg Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002
- [196] ROOSEN, A.; GREIL, P.: *Skript Werkstoffkunde 1 für den Maschinenbau, Mechatronik und Wirtschaftsingenieurwesen*. Department Werkstoffwissenschaften, FAU Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2008
- [197] RÜCKERT-JOHN, J.; BORMANN, I.; JOHN, R.: *Repräsentativumfrage zu Umweltbewusstsein und Umweltverhalten im Jahr 2012: Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Förderkennzeichen 3711 17 11*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, Marburg, 2013
- [198] SALMANG, H.; SCHOLZE, H.: *Keramik*. Springer-Verlag, Berlin, 2007
- [199] SCHAEFER, H.: *Betriebsverhalten und –kennlinien von Anlagen und Maschinen*. IfE-Schriftenreihe, Heft 4, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik, TU-München, 1982
- [200] SCHIEFERDECKER, B.; FUENFGELD, C.; BONNESCHKY, A.: *Energiemanagement-Tools. Anwendung im Industrieunternehmen*. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [201] SCHILD, H.; DUMM, T.: *Energie und Wärmelehre: Lerntext, Aufgaben mit kommentierten Lösungen und Kurztheorie*. 1. Auflage, Compendio Bildungsmedien AG, Zürich, 2009
- [202] SCHRÖTER, M.; WEIßFLOCH, U.; BUSCHAK, D.: *Energieeffizienz in der Produktion – Wunsch oder Wirklichkeit?: Energieeinsparpotenziale und Verbreitungsgrad energieeffizienter Techniken*. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Mitteilungen aus der ISI-Erhebung 51, November 2009
- [203] SCHRÖTER, M.; WEIßFLOCH, U.; BUSCHAK, D.: *Energieeffizienz in der Produktion – Wunsch oder Wirklichkeit?: Energieeinsparpotenziale und Verbreitungsgrad energieeffizienter Techniken*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2009
- [204] SCHULTE, D.; KREITLEIN, S.; FRANKE, J.: *Analyse und Bewertung veröffentlichter Kennzahlensystematiken und Konzeption von Ansätzen zur branchenübergreifenden Bewertung der Energieeffizienz von produzierenden Unternehmen*. FAU, Erlangen- Nürnberg, 2014 - Projektarbeit
- [205] Schulze, W.: *Allgemeine und physikalische Chemie*. Teil 2. 6. Auflage, Walter de Gruyter Verlag, 1968
- [206] SCHWENDER, S.; KREITLEIN, S.; FRANKE, J.: *Analyse und Konzeptionierung von Methoden zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion aus Sicht der Arbeitsvorbereitung*. FAU, Erlangen- Nürnberg, 2014 - Masterarbeit
- [207] SEIDEL, W.; HAHN, F.: *Werkstofftechnik. Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung – Anwendung*. 10. Aufl., Hanser Verlag; München, 2014
- [208] SIEBERT, G.; KEMPF, S.: *Benchmarking – Leitfaden für die Praxis*. 3. Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [209] SIEGERT, K.: *Blechumformung. Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2015
- [210] SIEMENS AG: *Langfristig denken. Antworten geben*. Jahresbericht 2013. München, 2014

- [211] SIEMENS AG: *Multifunktionsmessgerät SENTRON PAC4200 – Systemhandbuch*. Dokumentbestellnummer: 3ZX1012-0KM42-3AB0 11/2010, Siemens AG, 2008
- [212] SMOLT CZYK, U.: *Grundbau-Taschenbuch*. Ernst & Sohn, Berlin, 2001
- [213] SPRENG, S.; KOHL, J.; FRANKE, J.: *Development of an Adjustable Measuring System for Electrical Consumptions in Production*. In: Franke, J.; Kreitlein, S. (Hrsg.): Green Factory Bavaria Colloquium 2014, Applied Mechanics and Materials Vol 655, Trans Tech Publications, Switzerland, 2014
- [214] STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS): *Daten zur Energiepreisentwicklung: Lange Reihen von Januar 2000 bis November 2016*. Wiesbaden, 2016
- [215] STEPHAN, K.; MAYINGER, F.: *Thermodynamik, Grundlagen und technische Anwendungen*. 19. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013
- [216] STIENS, H.: *Ermittlung des gesamtheitlichen Wirkungsgrades als Kennzahl zur rationellen Energienutzung in der Produktionstechnik*. Shaker, Umformtechnische Schriften Band 95, Aachen, 2000
- [217] STRUNZ, H.; NICKEL, E.: *Strunz Mineralogical Tables*. 9. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, 2001
- [218] SYSKA, A.: *Produktionsmanagement. Das A-Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute*. Gabler, Wiesbaden, 2006
- [219] THIEDE, S.: *Energy efficiency in manufacturing systems. Sustainable production, life cycle engineering and management*. Springer Verlag, Berlin, New York, 2012
- [220] TIETZ, H.-P.: *Systeme der Ver- und Entsorgung. Funktionen und räumliche Strukturen*. 1. Aufl., Teubner Verlag, Wiesbaden, 2007
- [221] TIPLER, P. A.; BASLER, M.; DOHMEN, R.; MOSCA, G.; HEINISCH, C.; SCHLEITZER, A.; ZILLGITT, M.; WAGNER, J.; KOMMER, C.: *Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 2014
- [222] TZSCHEUTSCHLER, R.; OLBRISCH, H.; JORDAN, W.: *Technologie des Elektromaschinenbaus*. 1. Auflage. Verlag Technik, Berlin, 1990
- [223] UMWELTBUNDESAMT: *Die Energieverbrauchskennzeichnung für Fernsehgeräte*. URL http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/bilder/dateien/fernseheretikett_2011.pdf - Überprüfungsdatum 2013-11-27
- [224] VDI: *VDI 3807 Blatt 4. August 2008. Energie- und Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude - Teilkennwerte elektrische Energie*. Beuth Verlag, Berlin 2008
- [225] VDI: *VDI 4402. November 2000. Benchmarking*. Beuth Verlag, Berlin 2000
- [226] VDI: *VDI 4661 Energiekenngrößen - Grundlagen - Methodik*. VDI-Richtlinie 4661, August 2014
- [227] VDI: *VDI 4661. September 2003. Energiekenngrößen - Definitionen – Begriffe – Methodik*. Beuth Verlag, Berlin 2003
- [228] VDI: *VDI Gesellschaft Energietechnik: Rationelle Energienutzung in der Industrie – ein Beitrag zum Klimaschutz*. VDI Verlag, Düsseldorf 2003
- [229] VDMA 66412-4:2015-03: *Manufacturing Execution Systems (MES) - Kennzahlen für Energiemanagement*. VDMA, Frankfurt, 2015

- [230] VOIGT, K.-I.: *Industrielles Management: Industriebetriebslehre aus prozessorientierter Sicht*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- [231] VOIGT, K.-I.: *Stichwort: Massengüter*.
In: Springer Gabler Verlag (Hrsg.), Gabler Wirtschaftslexikon. URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/56435/massengueter-v8.html> -
Überprüfungsdatum 2016-05-01
- [232] VOIGT, K.-I.: *Stichwort: Produkt*.
In: Springer Gabler Verlag (Hrsg.), Gabler Wirtschaftslexikon,
URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/73950/produkt-v6.html> -
Überprüfungsdatum 2015-05-30
- [233] VOIGT, K.-I.: *Stichwort: Produktionsprozess*.
In: Springer Gabler Verlag (Hrsg.), Gabler Wirtschaftslexikon. URL
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/8557/produktionsprozess-v9.html> -
Überprüfungsdatum 2015-05-30
- [234] VOIGT, K.-I.: *Stichwort: Standort*.
In: Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon,
URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55249/standort-v6.html> -
Überprüfungsdatum 2015-05-30
- [235] VOIGT, K.-I.: *Stichwort: Verfahren*.
In: Springer Gabler Verlag (Hrsg.), Gabler Wirtschaftslexikon,
URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/73583/verfahren-v4.html>
Überprüfungsdatum 2015-05-30
- [236] VOIGT, K.-I.: *Stichwort: Werk*.
In: Springer Gabler Verlag (Hrsg.), Gabler Wirtschaftslexikon,
URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/2988/werk-v10.html>
Überprüfungsdatum 2015-05-30
- [237] VOIGT, K.-I.: *Strategische Unternehmensplanung: Grundlagen – Konzepte – Anwendung*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1993
- [238] WEBER, J.: *Stichwort: Gemeinkosten*.
In: Springer Gabler Verlag (Hrsg.), Gabler Wirtschaftslexikon,
URL <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/1504/gemeinkosten-v5.html> -
Überprüfungsdatum 2015-07-10
- [239] WEIßBACH, W.; DAHMS, M.; JAROSCHEK, C.: *Werkstoffkunde, Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. 19. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015
- [240] WESTKÄMPER, E.; WARNECKE H.-J.: *Einführung in die Fertigungstechnik*.
8. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- [241] WIELAND.: *Press und Ziehprodukte – M10*, unter http://www.wieland.de/media-Pool/content/media/de/datenblaetter/datenblaetter_z/M10.pdf
Überprüfungsdatum 2016-02-14
- [242] WILDE, F.: *Rückbau kerntechnischer Anlagen*. Diplomica, Hamburg, 2006
- [243] WITTEL, H. (ET. AL.): *Roloff/Matek Maschinenelemente*.
22. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2015
- [244] WOCHESLÄNDER, C.: *Mutuelles Benchmarking für Produktionsunternehmen. Eine Methode zur effizienten Durchführung von Benchmarking-Projekten mit exzellentem wechselseitigem Nutzen*.

- Monographic Series TU Graz Techno- und sozioökonomisch orientierte Betriebswirtschaft, Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, 2007
- [245] WÖHE, G.: *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 24. Auflage. Franz Vahlen Verlag, München, 2010
- [246] WOHINZ, J. W.; MOOR, M.: *Betriebliches Energiemanagement. Aktuelle Investition in die Zukunft*. Springer Verlag, Wien, 1989
- [247] WOLFFGRAMM, H.: *Allgemeine Techniklehre – Elemente, Strukturen und Gesetzmäßigkeiten*. S. 133, Skript Universität-Potsdam, Frankfurt/Oder, 2006
- [248] WOSNITZA, F.; HILGERS, H. G.: *Energieeffizienz und Energiemanagement: Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012

17 Anhang

Energiekennzahlen:

Tabelle 23: Spezifische Energiekennzahlen mit Berechnungsweise und Einheit

Energiekennzahl	Berechnung	Einheit
Mitarbeiterspezifischer Energieverbrauch	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Anzahl der Mitarbeiter}}$	$\frac{kWh}{MA}$
Energieverbrauch bezogen auf Personalaufwand	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Personalaufwand}}$	$\frac{kWh}{h}$
Kompaktheit eines Gebäudes	$\frac{\text{Hüllfläche}}{\text{Gebäudevolumen}}$	m^{-1}
Energieverbrauch bezogen auf Fläche	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Grundfläche}}$	$\frac{kWh}{m^2}$
Energieverbrauch bezogen auf Volumen	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Rauminhalt}}$	$\frac{kWh}{m^3}$
Wirkungsgrad	$\frac{\text{Nutzbare abgegebene Energie}}{\text{Zugeführte Energie}}$	%
Nutzungsgrad (Zeitraumbetrachtung)	$\frac{\text{Nutzbare abgegebene Energie}}{\text{Gesamte zugeführte Energie}}$	%
Equipment Energy Effectiveness (EEE)	$\text{Energienutzungsgrad} \cdot \text{Energieleistungsgrad} \cdot \text{Energiequalitätsrate}$	%
Spezifischer Energieverbrauch (Produzierte Einheit)	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Einheit}}$	$\frac{kWh}{\text{Stück}}$
Spezifischer Energieverbrauch bez. auf Materialeinsatz	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Masse oder Volumen}}$	$\frac{kWh}{kg \text{ oder } l}$
Energieintensität	$\text{Leistungsaufnahme} \cdot \text{Kundentakt} \cdot \text{Anzahl Ressourcen}$	$\frac{kWh}{\text{Stück}}$
Effizienzgrad	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Referenzeinsatzenergie}}$	%
Durchschnittlicher spezifischer Energieverbrauch	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Zeit}}$	kW
Benötigte Energie für genormtes Testwerkstück	Einsatzenergie	kWh
Umsatzspezifischer Energieverbrauch	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Umsatz}}$	$\frac{kWh}{\text{€}}$
Energieproduktivität	$\frac{\text{Wertschöpfung}}{\text{Einsatzenergie}}$	$\frac{\text{€}}{kWh}$
Energieverbrauch bezogen auf Gesamtkosten	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Gesamtkosten}}$	$\frac{kWh}{\text{€}}$
Anteil der Energiekosten an Gesamtkosten	$\frac{\text{Energiekosten}}{\text{Gesamtkosten}}$	%
Anteil der Energiekosten an Gesamterlösen	$\frac{\text{Energiekosten}}{\text{Gesamterlöse}}$	%

Unternehmensspezifische Kennzahlen bezüglich Energieverbrauch und CO₂-Emission aus Geschäftsberichten:

Tabelle 24: Übersicht der untersuchten Unternehmen

Produzierende Unternehmen				
Metall-und Elektroindustrie				Chemieindustrie
Automobil-hersteller	Automobil-zulieferer	Maschinen-/Anlagenbau	Elektrogeräte-hersteller	Keine Untergliederung
Audi	Bosch	Krones	BSH	Altana
BMW	Continental	Kuka	Miele	BASF
Daimler	ElringKlinger	Siemens	Infineon	Bayer
Fiat		Sulzer		Fuchs
Ford		ThyssenKrupp		Heidelberg
GM		Voith		Henkel
Jaguar				K+S
Nissan				Linde
Peugeot				Merck
Toyota				Lanxess
Volkswagen				Wacker
Die fett gedruckten Unternehmen sind Mischkonzerne die in mehreren Branchen tätig sind.				

Tabelle 25: Veröffentlichte Kennzahlen bezogen auf den Energieverbrauch

Kennzahlen Energieverbrauch	Berechnung	Einheit
Gesamtenergieverbrauch	<i>Gesamtenergieverbrauch</i>	<i>kWh</i>
Produktionsbezogener Energieverbrauch	$\frac{\text{Energieverbrauch}}{\text{Produzierte Einheit}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{Stück}}$
Energieverbrauch je Produktgrundfläche	$\frac{\text{Energieverbrauch}}{\text{Produktgrundfläche}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Energieverbrauch je Tonne Produkt	$\frac{\text{Energieverbrauch}}{\text{Tonne Produkt}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{t}}$
Anteil zugekaufter Energie	$\frac{\text{Zugekaufte Energie}}{\text{Gesamtenergie}}$	%
Anteil erneuerbare Energie	$\frac{\text{Erneuerbare Energie}}{\text{Gesamtenergie}}$	%
Verhältnis direkte und indirekte Energie	$\frac{\text{Direkte Energie}}{\text{Indirekte Energie}}$	%
Energieverbrauch je Segment	$\frac{\text{Energieeinsatz pro Einheit}}{\text{Segment}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{Segment}}$
Energieverbrauch je Wertschöpfung	$\frac{\text{Gesamtenergieverbrauch}}{\text{Wertschöpfung}}$	%

Tabelle 26: Veröffentlichte Kennzahlen bezogen auf die CO₂-Emissionen

Kennzahlen CO ₂ -Emissionen	Berechnung	Einheit
Gesamte CO ₂ -Emissionen	<i>Gesamte CO₂ – Emissionen</i>	<i>kg</i>
Emissionen je Mitarbeiter	$\frac{CO_2 - Emissionen}{Mitarbeiter}$	$\frac{kg}{MA}$
Emissionen je Tonne Produkt	$\frac{CO_2 - Emissionen}{Tonne\ Produkt}$	-
Emissionen je Umsatz	$\frac{CO_2 - Emissionen}{Umsatz}$	$\frac{kg}{€}$
Energiebedingte CO ₂ -Emissionen	<i>Energiebedingte CO₂ – Emissionen</i>	<i>kg</i>
Emissionen je produzierte Einheit	$\frac{CO_2 - Emissionen}{Stück}$	$\frac{kg}{Stück}$
Emissionen je Wertschöpfung	$\frac{CO_2 - Emissionen}{Wertschöpfung}$	%

Tabelle 27: Veröffentlichte Energiekennzahlen und Größen

Kennzahl	Berechnung/Definition	Einheit	Quelle
Abfallerzeugung und -verwertung	<i>angefallener Abfall</i>	<i>t</i>	[37]
Ausgaben für den Umweltschutz	<i>Investitionen für den Umweltschutz + Betriebskosten für den Umweltsch.</i>	€	[237]
CO ₂ -Emissionen	<i>angefallene CO₂-Emissionen</i>	<i>t</i>	[37] [3]
Direkte Treibhausgas-Emissionen	<i>angefallene direkte Treibhausgas-Emissionen</i>	<i>t</i>	[13]
Effizienzsteigerung im Bereich Abfallauf- kommen gegenüber der Vergleichsbasis	$\left(1 - \frac{\text{Abfälle im Jahr } x}{\text{Abfälle im Jahr } y}\right)$	%	[210]
Effizienzsteigerung im Bereich CO ₂ - Emissionen geg. der Vergleichsbasis	$\left(1 - \frac{CO_2\text{-Emissionen im Jahr } x}{CO_2\text{-Emissionen im Jahr } y}\right)$	%	[210]
Effizienzsteigerung im Bereich Energie- effizienz gegenüber der Vergleichsbasis	$\left(1 - \frac{\text{Einsatzenergie im Jahr } x}{\text{Einsatzenergie im Jahr } y}\right)$	%	[210]
Energieeffizienz	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Masse}}$	$\frac{kWh}{kg}$	[13]
Energieverbrauch	<i>eingesetzte Energie</i>	<i>kWh</i>	[37] [3]
Indirekte Treibhausgas-Emissionen	<i>angefallene indirekte Treibhausgas-Emissionen</i>	<i>t</i>	[13]
Overall Equipment and Energy Efficiency index	<i>Availability · Performance · Quality · Energy</i>	-	[117]
Primärenergieeinsatz	<i>eingesetzte Primärenergie</i>	<i>J</i>	[13] [11]
Sekundärenergieeinsatz	<i>eingesetzte Sekundärenergie</i>	<i>J</i>	[13]
Spezifischer Energieverbrauch (Electrical Energy Efficiency Ratio)	$\frac{\text{Einsatzenergie}}{\text{Masse}}$	$\frac{kWh}{kg}$	[172]
Wasserverbrauch/ Wassereinsatz	<i>eingesetztes Wasser</i>	<i>m³</i>	[11]

Relevante TQM, Lean Management und Six Sigma Methoden:

Tabelle 28: Übersicht der quantitativen TQM-Methoden

Quantitative TQM-Methode	Zuordnung der Methode	Visualisierungsart
Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)	Entwicklungsprozess	
Genichi-Taguchi-Methode	Herstellungsprozess	Graph
Histogramm	„Q7“	Säulendiagramm
Korrelationsdiagramm	„Q7“	Graph
Netzplantechnik	„M7“	Modell
Gesamtanlageneffektivität (OEE)	Herstellungsprozess	
Prozessfähigkeitsuntersuchung (PFU)	Herstellungsprozess	
Prozesswirkungsgrad	Herstellungsprozess	
Quality-Function-Deployment (QFD)	Entwicklungsprozess	Graph
Qualitätsregelkarte	„Q7“	Graph
Relationendiagramm	„M7“	Modell
ServQual-Methode	„D7“	

Tabelle 29: Übersicht relevanter Lean Management Methoden

Relevante Lean Management Methoden	Zuordnung der Methode
Datensammlungsplan	MEASURE - Daten sammeln
Stichprobenstrategie	
Messsystemanalyse (MSA)	
Prozessleistung	MEASURE - Prozessleistung ermitteln
Wertstrommethode/ Energiewertstrommethode	ANALYZE - Prozess analysieren
Wertanalyse	
Prozesseffizienz	
Kapazitätsanalyse	
Daten analysieren	ANALYZE - Daten analysieren
Total Productive Maintenance (TPM)	IMPROVE - Lösungen erzeugen
Audits	CONTROL - Erfolg sichern
Fehlersammelliste	Ishikawa's 7 statistische Werkzeuge
Methods Time Measurement (MTM)	-
Total Effectiveness Equipment Productivity (TEEP)	-

Übersicht der Grundoperationen für die Fertigungsverfahren der DIN 8580:

Die folgende Tabelle zeigt alle Fertigungsverfahren der DIN 8580. Für jedes in der Stückgutproduktion eingesetzte Fertigungsverfahren ist die zugehörige Grundoperation genannt. Fertigungsverfahren, die nicht in der Stückgutproduktion eingesetzt werden, sind in der Spalte der Grundoperation mit „k.A.“, im Sinne von keine Anwendung, gekennzeichnet. Fertigungsverfahren für die auf Basis der normativen Bezeichnung, ohne nähere Spezifizierung des Vorgangs, keine Grundoperation direkt abgeleitet werden kann, sind mit „n.s.“ für nicht spezifiziert gekennzeichnet.

Tabelle 30: Grundoperationen der Fertigungsverfahren der DIN 8580

Fertigungsverfahren	Grundoperation
1. Urformen	
1.1 Urformen aus dem flüssigen Zustand	
1.1.1 Schwerkraftgießen	GOP 6: Schmelzen
1.1.2 Druckgießen	GOP 6: Schmelzen
1.1.3 Niederdruckgießen	GOP 6: Schmelzen
1.1.4 Schleudergießen	GOP 6: Schmelzen
1.1.5 Stranggießen	GOP 6: Schmelzen
1.1.6 Schäumen	GOP 6: Schmelzen
1.1.7 Tauchformen	GOP 6: Schmelzen
1.1.8 Urformen von faserverstärkten Kunststoffen	GOP 6: Schmelzen
1.1.9 Züchten von Kristallen	GOP 6: Schmelzen
1.2 Urformen aus dem plastischen Zustand	
1.2.1 Pressformen	GOP 1: Drücken
1.2.2 Spritzgießen	GOP 6: Schmelzen
1.2.3 Spritzpressen	GOP 6: Schmelzen
1.2.4 Strangpressen	GOP 1: Drücken
1.2.5 Ziehformen	GOP 2: Ziehen
1.2.6 Kalandrieren	GOP 1: Drücken
	GOP 2: Ziehen
1.2.7 Blasformen	GOP 1: Drücken
1.2.8 Modellieren	k. A.
1.3 Urformen aus dem breiigen Zustand	
1.3.1 Gießen von Beton, Gips	k. A.
1.3.2 Gießen von Porzellan, Keramik	GOP 6: Schmelzen
1.4 Urformen aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand	
1.4.1 Pressen	GOP 1: Drücken
1.4.2 Sandformen	GOP 1: Drücken
1.4.3 Urformen durch thermisches Spritzen	GOP 6: Schmelzen
1.8 Urformen aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand	
1.8.1 Abscheiden aus der Dampfphase in einer Form	GOP 7: Verdampfen
	GOP 8: Sublimieren
1.9 Urformen aus dem ionisierten Zustand	
1.9.1 Elektrolytisches Abscheiden in einer Form	GOP 7: Verdampfen
	GOP 8: Sublimieren

2. Umformen	
2.1 Druckumformen	
2.1.1 Walzen	GOP 1: Drücken
2.1.2 Freiformen	GOP 1: Drücken
2.1.3 Gesenkformen	GOP 1: Drücken
2.1.4 Eindrücken	GOP 1: Drücken
2.1.5 Druckdrücken	GOP 1: Drücken
2.1.6 Umformstrahlen	GOP 1: Drücken
2.1.7 Oberflächenveredelungsstrahlen	GOP 1: Drücken
2.2 Zugdruckumformen	
2.2.1 Durchziehen	GOP 2: Ziehen
	GOP 1: Drücken
2.2.2 Tiefziehen	GOP 2: Ziehen
	GOP 1: Drücken
2.2.3 Drücken	GOP 2: Ziehen
	GOP 1: Drücken
2.2.4 Kragenziehen	GOP 2: Ziehen
	GOP 1: Drücken
2.2.5 Knickbauchen	GOP 2: Ziehen
	GOP 1: Drücken
2.2.6 Innenhochdruckweitstauchen	GOP 2: Ziehen
	GOP 1: Drücken
2.3 Zugumformen	
2.3.1 Längen	GOP 2: Ziehen
2.3.2 Weiten	GOP 2: Ziehen
2.3.3 Tiefen	GOP 2: Ziehen
2.4 Biegeumformen	
2.4.1 Biegeumformen mit geradliniger Werkzeugbewegung	GOP 4: Biegen
2.4.2 Biegeumformen mit drehender Werkzeugbewegung	GOP 4: Biegen
2.5 Schubumformen	
2.5.1 Verschieben mit geradliniger Werkzeugbewegung	GOP 3: Scheren
2.5.2 Verschieben mit drehender Werkzeugbewegung	GOP 3: Scheren
3. Trennen	
3.1 Zerteilen	
3.1.1 Scherschneiden	GOP 3: Scheren
3.1.2 Messerschneiden	GOP 3: Scheren
3.1.3 Beißschneiden	GOP 3: Scheren
3.1.4 Spalten	GOP 3: Scheren
3.1.5 Reißen	GOP 2: Ziehen
3.1.6 Brechen	GOP 5: Tordieren
	GOP 4: Biegen
3.2 Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide	
3.2.1 Drehen	GOP 3: Scheren
3.2.2 Bohren/ Senken/ Reiben	GOP 3: Scheren
3.2.3 Fräsen	GOP 3: Scheren
3.2.4 Hobeln/Stoßen	GOP 3: Scheren

3.2.5 Räumen	GOP 3: Scheren
3.2.6 Sägen	GOP 3: Scheren
3.2.7 Feilen/ Raspeln	GOP 3: Scheren
3.2.8 Bürstspanen	GOP 3: Scheren
3.2.9 Schaben/ Meißeln	GOP 3: Scheren
3.3 Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide	
3.3.1 Schleifen mit rotierendem Werkzeug	GOP 3: Scheren
3.3.2 Bandschleifen	GOP 3: Scheren
3.3.3 Hubschleifen	GOP 3: Scheren
3.3.4 Honen	GOP 3: Scheren
3.3.5 Läppen	GOP 3: Scheren
3.3.6 Strahlspanen	GOP 3: Scheren
3.3.7 Gleitspanen	GOP 3: Scheren
3.4 Abtragen	
3.4.1 Thermisches Abtragen	GOP 6: Schmelzen
	GOP 7: Verdampfen
	GOP 8: Sublimieren
	GOP 12: Verbrennen
3.4.2 Chemisches Abtragen	GOP 10: Chemisches Aktivieren
3.4.3 Elektrochemisches Abtragen	GOP 10: Chemisches Aktivieren
3.5 Zerlegen	
3.5.1 Auseinandernehmen	<i>n. s.</i>
3.5.2 Entleeren	<i>n. s.</i>
3.5.3 Lösen kraftschlüssiger Verbindungen	<i>n. s.</i>
3.5.4 Zerlegen von durch Urformen gefügter Teile	<i>n. s.</i>
3.5.5 Zerlegen von durch Umformen gefügter Teile	<i>n. s.</i>
3.5.6 Ablöten	GOP 6: Schmelzen
3.5.7 Lösen von Klebeverbindungen	<i>n. s.</i>
3.5.8 Zerlegen textiler Verbindungen	<i>k. A.</i>
3.6 Reinigen	
3.6.1 Reinigungsstrahlen	GOP 1: Drücken
3.6.2 Mechanisches Reinigen	<i>n. s.</i>
3.6.3 Strömungstechnisches Reinigen	<i>n. s.</i>
3.6.4 Lösemittelreinigen	GOP 10: Chemisches Aktivieren
3.6.5 Chemisches Reinigen	GOP 10: Chemisches Aktivieren
3.6.6 Thermisches Reinigen	GOP 6: Schmelzen
	GOP 12: Verbrennen
4. Fügen	
4.1 Zusammensetzen	
4.1.1 Auflegen/ Aufsetzen/ Schichten	GOP 14: Pose ändern
4.1.2 Einlegen/ Einsetzen	GOP 14: Pose ändern
4.1.3 Ineinanderschieben	GOP 14: Pose ändern
4.1.4 Einhängen	GOP 14: Pose ändern
4.1.5 Einrenken	GOP 14: Pose ändern
4.1.6 Federnd / Einspreizen	GOP 14: Pose ändern
	GOP 15: Vorspannen

4.2 Füllen	
4.2.1 Einfüllen	GOP 6: Schmelzen
	GOP 14: Pose ändern
4.2.2 Tränken /Imprägnieren	GOP 6: Schmelzen
	GOP 14: Pose ändern
4.3 Anpressen / Einpressen	
4.3.1 Schrauben	GOP 14: Pose ändern
	GOP15: Vorspannen
4.3.2 Klemmen	GOP 14: Pose ändern
	GOP 15: Vorspannen
4.3.3 Klammern	GOP 14: Pose ändern
	GOP 15: Vorspannen
	GOP 4: Biegen
	GOP 5: Tordieren
4.3.4 Fügen durch Presspassung	GOP 14: Pose ändern
	GOP 15: Vorspannen
4.3.5 Nageln / Einschlagen	GOP 14: Pose ändern
	GOP 15: Vorspannen
4.3.6 Verkeilen	GOP 14: Pose ändern
	GOP 15: Vorspannen
4.3.7 Verspannen	GOP 14: Pose ändern
	GOP 15: Vorspannen
4.4 Fügen durch Urformen	
4.4.1 Ausgießen	GOP 6: Schmelzen
4.4.2 Einbetten	GOP 6: Schmelzen
4.4.3 Vergießen	GOP 6: Schmelzen
4.4.4 Eingalvanisieren	GOP 11: Ionisieren
4.4.5 Ummanteln	GOP 6: Schmelzen
	GOP 1: Drücken
4.4.6 Kitten	GOP 6: Schmelzen
	GOP 1: Drücken
4.5 Fügen durch Umformen	
4.5.1 Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper	GOP 2: Ziehen
	GOP 1: Drücken
	GOP 4: Biegen
4.5.2 Fügen durch Umformen bei Blech-, Rohr- und Profiltteilen	GOP 2: Ziehen
	GOP 1: Drücken
	GOP 4: Biegen
4.5.3 Fügen durch Nietverfahren	GOP 2: Ziehen
	GOP 1: Drücken
4.6 Fügen durch Schweißen	
4.6.1 Pressverbindungsschweißen	GOP 6: Schmelzen
4.6.2 Schmelzverbindungsschweißen	GOP 6: Schmelzen
4.7 Fügen durch Löten	
4.7.1 Verbindungsweichlöten	GOP 6: Schmelzen
4.7.2 Verbindungshartlöten	GOP 6: Schmelzen

4.8 Kleben	
4.8.1 Kleben mit physikalisch abbindenden Klebstoffen	GOP 10: Chemisches Aktivieren
4.8.2 Kleben mit chemisch Abbindenden Klebstoffen	GOP 10: Chemisches Aktivieren
5. Beschichten	
5.1 Beschichten aus flüssigem Zustand	
5.1.1 Schmelztauchen	GOP 6: Schmelzen GOP 14: Pose ändern
5.1.2 Anstreichen / Lackieren	GOP 14: Pose ändern GOP 10: Chemisches Aktivieren
5.1.3 Färben	GOP 10: Chemisches Aktivieren GOP 9: Thermisches Aktivieren
5.1.4 Emaillieren / Glasieren	GOP 6: Schmelzen
5.1.5 Beschichten durch Gießen	GOP 6: Schmelzen
5.1.6 Drucken / Bedrucken	n. s.
5.1.7 Beschriften	n. s.
5.4 Beschichten aus körnigem oder pulverförmigem Zustand	
5.4.1 Wirbelsintern	GOP 14: Pose ändern GOP 9: Thermisches Aktivieren
5.4.2 Elektrostatisches Beschichten	GOP 11: Ionisieren GOP 9: Thermisches Aktivieren
5.4.3 Beschichten durch thermisches Spritzen	GOP 6: Schmelzen GOP 14: Pose ändern
5.6 Beschichten durch Schweißen	
5.6.1 Schmelzauftragsschweißen	GOP 6: Schmelzen
5.7 Beschichten durch Löten	
5.7.1 Auftrag-Weichlöten	GOP 6: Schmelzen
5.7.2 Auftrag-Hartlöten	GOP 6: Schmelzen
5.8 Beschichten aus gas- oder dampfförmigem Zustand	
5.8.1 Vakuumbedampfen	GOP 7: Verdampfen GOP 8: Sublimieren
5.8.2 Vakuumbestäuben	GOP 8: Sublimieren
5.9 Beschichten aus ionisiertem Zustand	
5.9.1 Galvanisches Beschichten	GOP 11: Ionisieren
5.9.2 Chemisches Beschichten	GOP 11: Ionisieren
6. Stoffeigenschaften ändern	
6.1 Verfestigen durch Umformen	
6.1.1 Verfestigungsstrahlen	GOP 1: Drücken
6.1.2 Verfestigen durch Walzen	GOP 1: Drücken
6.1.3 Verfestigen durch Ziehen	GOP 2: Ziehen
6.1.4 Verfestigen durch Schmieden	GOP 1: Drücken
6.2 Wärmebehandeln	
6.2.1 Glühen	GOP 9: Thermisches Aktivieren
6.2.2 Härten	GOP 9: Thermisches Aktivieren
6.2.3 Isothermisches Umwandeln	GOP 9: Thermisches Aktivieren
6.2.4 Anlassen / Auslagern	GOP 9: Thermisches Aktivieren
6.2.5 Vergüten	GOP 9: Thermisches Aktivieren

6.2.6 Tiefkühlen	GOP 9: Thermisches Aktivieren
6.2.7 Thermochemisches Behandeln	GOP 9: Thermisches Aktivieren
6.2.8 Aushärten	GOP 9: Thermisches Aktivieren
6.3 Thermomechanisches Behandeln	
6.3.1 Austenitformhärten	GOP 9: Thermisches Aktivieren
6.3.2 Heißisostatisches Nachverdichten	GOP 9: Thermisches Aktivieren
	GOP 1: Drücken
6.4 Sintern / Brennen	GOP 9: Thermisches Aktivieren
	GOP 1: Drücken
6.5 Magnetisieren	GOP 13: Magnetisieren
6.6 Bestrahlen	GOP 10: Chemisches Aktivieren
6.7 Photochemisches Verfahren	
6.7.1 Belichten	GOP 10: Chemisches Aktivieren

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52
Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53
Meisenbach Verlag, Bamberg
45,-- Euro

Band 1: Andreas Hemberger
**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion
durch wissensbasierte Systeme**
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe
**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter
**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen
durch den Einsatz der Simulationstechnik**
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss
**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität
im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden**
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz
**Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen**
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens
von Hartmetall-Fließpreßmatrizen**
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele
**Konzeption und Wirtschaftlichkeit
von Planungssystemen in der Produktion**
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer
**Technologisch orientierte Montageplanung
am Beispiel der Schraubtechnik**
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer
**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung
der rechnerintegrierten Teilefertigung**
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.

Band 13: Frank Vollertsen
**Pulvermetallurgische Verarbeitung
eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.

Band 14: Stephan Biermann
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik
für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern**
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.

Band 15: Uwe Geißler
**Material- und Datenfluß
in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.

Band 16: Frank Oswald Hake
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems
für automatisierte Montagezellen**
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.

Band 17: Herbert Reichel
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.

Band 18: Josef Scheller
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen
für rechnergeführte Montagezellen**
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrizze
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.

Band 20: Joachim Schmid
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern**
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.

Band 21: Egon Sommer
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.

Band 22: Georg Geyer
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.

Band 23: Rainer Flohr
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik
in der Oberflächenmontage (SMT)**
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.

Band 24: Alfons Rief
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.

Band 25: Christoph Thim
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.

Band 26: Roland Müller
**CO₂-Laserstrahlschneiden
von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

Band 28: Martin Hoffmann
**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette
für die Herstellung von Blechbiegeteilen**
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.

Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D–Laserstrahlbearbeitung
von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.

Band 31: Hubert Reinisch
**Planungs– und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.

Band 33: Joachim Hutfless
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.

Band 34: Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.

Band 35: Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.

Band 36: Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.

Band 37: Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.

Band 38: Robert Schmidt–Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.

Band 39: Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe
mit XeCl–Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.

Band 40: Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung
an Steuerungssoftware von SMD–Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.

Band 41: Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.

Band 42: Armin Gropp
**Anlagen– und Prozeßdiagnostik
beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG–Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

Band 43: Werner Heckel
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung
mit dem Lichtschnittverfahren**
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.

Band 44: Armin Rothhaupt
**Modulares Planungssystem
zur Optimierung der Elektronikfertigung**
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 46: Bodo Vormann
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung
komplexer Blechbiegeteile**
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.

Band 48: Rainer Klotzbücher
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung
in flexiblen Fertigungssystemen**
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.

Band 50: Jörg Franke
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.

Band 52: Michael Solvie
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung
in Feldkommunikationssystemen**
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.
ISBN 3-87525-070-2

Band 54: Thomas Rebhan
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-075-3

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-074-5

Band 56: Uwe Schönherr
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen
mit kooperierenden Robotern**
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-076-1

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-079-6

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D–Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-080-X

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA–Anwendungen über einem STEP–Produktmodell
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-081-8

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-082-6

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-083-4

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt– und Prozeßplanung
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-086-9

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.
ISBN 3-87525-089-3

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC–Steuerungen zur Prozeß– und Programmoptimierung
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5

Band 67: Klaus–Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs– und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D–Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-093-1

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-094-X

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-095-8

Band 71: Michael Steber
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4

Band 73: Volker Franke
**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**
143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2

Band 74: Herbert Scheller
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0

Band 75: Arthur Meßner
**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-100-8

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-101-6

Band 77: Michael Schwind
**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-102-4

Band 78: Manfred Gerhard
**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-103-2

Band 79: Elke Rauh
**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-104-0

Band 80: Sorin Niederkorn
**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-105-9

Band 81: Stefan Schubert
**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-106-7

Band 82: Armando Walter Colombo
**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**
216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1

Band 83: Otto Meedt
**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**
186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

Band 84: Knuth Götz
**Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1

Band 85: Ralf Luchs
**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe
zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-113-7

Band 86: Frank Pöhlau
**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung
räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6

Band 88: Gerhard Luhn
**Implizites Wissen und technisches Handeln
am Beispiel der Elektronikproduktion**
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
ISBN 3-87525-116-4

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2

Band 90: Hans-Jörg Pucher
**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken
und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2

Band 92: Doris Schubart
**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung
beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung**
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
**Laserstrahlintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung,
Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5

Band 94: Hans-Martin Biehler
**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung
und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1

Band 95: Wolfgang Becker
**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften
excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-X

Band 96: Philipp Hein
**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren:
Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger

**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach

**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach

**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk

**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlögl

**Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel

**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert

**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer

**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel

**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel

**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter

**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli

**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller

Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion

128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer

Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen

178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung

161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)

165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber

Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren

122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi

Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion

155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein

Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften

122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi

Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten

181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik

176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt

Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion

152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler

Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile

126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche

Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung

111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-183-0

Band 122: Jan-Oliver Brassel

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen

148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-181-4

Band 123: Mark Geisel

**Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen
mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik**

135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßer

**Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die MID-Technik**

148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen
elektronischer Kontakte**

159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

**Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen
von Silizium für Komponenten der Optoelektronik**

159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

**Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente
mit Diodenlaserstrahlung**

143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

**Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen**

113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter
Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**

133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

**Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die
flexible Sensorführung von Industrierobotern**

167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

**Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe
zum Laserstrahlschweißen**

116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung –

**Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und
Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation**

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

**Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der
Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten**

179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**

202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**

132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**

158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik
für mechatronische Baugruppen**

207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**

187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-191-1

Band 141: Hinnerk Hagenah

**Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden
Maßhaltigkeit für das Blechbiegen**

131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-192-X

Band 142: Ralf Eckstein

**Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile –
Materialeinfluss und Materialverhalten**

148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-193-8

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien
mit homogener Lichtlinie**

138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-196-2

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen**

139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

**System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit
Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen**

124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-198-9

Band 146: Thomas Neudecker

**Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-
Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung**

166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-200-4

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-204-7

Band 149: Thomas Wurm

**Laserstrahljustieren mittels Aktoren –
Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik**

122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

**Wirkmedienbasierte Blechumformung:
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie**

146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

**Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme
für die adaptive Laserbearbeitung**

282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

**Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise
für flexible Formgebungsprozesse**

149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

**Massivumformen metallischer Kleinstteile
bei erhöhter Prozesstemperatur**

158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

**Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit
in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen**

186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen

Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung
des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens

164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

**Qualifizierung einer Prozesskette zum
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile**

148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

**Großserientauglichkeit
trockenschmierstoffbeschichteter
Aluminiumbleche im Presswerk**

Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie,
zum Umformverhalten und Bauteilversuche

104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-221-7

Band 158: Agus Sutanto

**Solution Approaches for Planning of Assembly Systems
in Three-Dimensional Virtual Environments**

169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-220-9

Band 159: Matthias Boiger

**Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen
auf der Basis flexibler Schaltungsträger**

175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-222-5

Band 160: Matthias Pitz

Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle

120 Seiten, 18 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-223-3

Band 161: Meik Vahl

**Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses
beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen**

165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-224-1

Band 162: Peter K. Kraus

**Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und
kostenoptimierten Wertschöpfung**

181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-226-8

Band 163: Adrienn Cser

Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung

146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-227-6

Band 164: Markus C. Hahn

**Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von
Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern**

143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-228-4

Band 165: Gordana Michos

Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen

146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-230-6

Band 166: Markus Stark

Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays

158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-231-4

Band 167: Yurong Zhou

**Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen
Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion**

156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-232-2

Band 168: Werner Enser

**Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer
Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen**

190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-233-0

Band 169: Katrin Melzer

**Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen
Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle**

155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-234-9

Band 170: Alexander Putz

**Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von
armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall**

137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-237-3

Band 171: Martin Prechtl

Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien – System- und Prozesstechnik

154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-238-1

Band 172: Markus Meidert

Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung

131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-239-X

Band 173: Bernd Müller

Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile

147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-240-3

Band 174: Alexander Hofmann

Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen

136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9
ISBN 3-87525-243-8

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen

177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0
ISBN 3-87525-246-2

Band 176: Attila Komlódi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4
ISBN 3-87525-248-9

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen

140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1
ISBN 3-87525-249-7

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter

148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7
ISBN 3-87525-250-0

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse

154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4
ISBN 3-87525-251-9

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)

181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion

172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere

171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3

Band 183: Stefan Junker

**Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung
permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten**
173 Seiten, 75 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-259-0

Band 184: Rainer Kohlbauer

**Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung
wirkmedienbasierter Blechumformprozesse**
135 Seiten, 50 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-260-6

Band 185: Klaus Lamprecht

**Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer
Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge**
137 Seiten, 81 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-265-1

Band 186: Bernd Zolleiß

**Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung
mechatronischer Baugruppen**
180 Seiten, 117 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-266-8

Band 187: Michael Kerausch

**Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal
wärmebehandelter Aluminiumplatten**

146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tabellen. 2007.

ISBN 978-3-87525-267-5

Band 188: Matthias Weber

**Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen
durch innovative Softwaresysteme**

183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tabellen. 2007.

ISBN 978-3-87525-269-9

Band 189: Thomas Frick

**Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen
beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen**

104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen. 2007.

ISBN 978-3-87525-268-2

Band 190: Joachim Hecht

**Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte
Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen**

107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tabellen. 2007.

ISBN 978-3-87525-270-5

Band 191: Ralf Völkl

**Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und
Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung**

178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen. 2008.

ISBN 978-3-87525-272-9

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen

164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tabellen. 2008.

ISBN 978-3-87525-273-6

Band 193: Cornelia Hoff

**Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim
Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5**

133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tabellen. 2008.

ISBN 978-3-87525-275-0

Band 194: Christian Alvarez

**Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von
Lötprozessen in der Elektronikproduktion**

149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tabellen. 2008.

ISBN 978-3-87525-277-4

Band 195: Andreas Kunze

**Automatisierte Montage von makromechatronischen
Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze**

160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen. 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen
152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen
175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreischweißen metallischer Werkstoffe
179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahliefschweißen
138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
167 Seiten, 98 Bilder, 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlenschweißen transparenter Polymerbauteile
160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreibschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen- Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlsschweißen thermoplastischer Kunststoffe
129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil
165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3

Band 219: Andreas Dobroschke

Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7

Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4

Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1

Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff- prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2

Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6

Band 226: Peter Sebastian Feuser

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung

195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3

Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6

Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7

Band 229: Alexander Grimm

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit

160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-348-8

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blech-massivumformung

165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens

119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8

Band 241: Karl-Heinz Leitz

Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung

154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9

Band 242: Markus Michl

Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose

182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6

Band 243: Vera Sturm

Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen

113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-357-3

Band 244: Christian Neudel

Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunkgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau

178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-358-0

Band 245: Anja Neumann

Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk

162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-360-3

Band 246: Ulf-Hermann Quentin

Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen

137 Seiten, 68 Bilder, 6 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-361-0

Band 247: Erik Lamprecht

Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen

148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-362-7

Band 248: Sebastian Rösel

Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium

148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-363-4

Band 249: Paul Hippchen

Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung

163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-364-1

Band 250: Martin Zubeil

Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren

171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-365-8

Band 251: Alexander Kühl

Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik

142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-367-2

Band 252: Thomas Albrecht

Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen

198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-368-9

Band 253: Florian Risch

Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles

185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-369-6

Band 254: Markus Weigl

Laserstrahlischweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen

184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-370-2

Band 255: Johannes Noneder

Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen

161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-371-9

Band 256: Andreas Reinhardt

Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger

123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-373-3

Band 257: Tobias Schmuck

Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation

151 Seiten, 74 Bilder 2014.

ISBN 978-3-87525-374-0

Band 258: Bernd Eichenhüller

Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen

127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-375-7

Band 259: Felix Lütkeke

Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren

152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-376-4

Band 260: Martin Grüner

Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium

144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-379-5

Band 261: Christian Brock

Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition

126 Seiten, 65 Bilder, 6 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-380-1

Band 262: Peter Vatter

Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode

145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-381-8

Band 263: Florian Klämpfl

Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung

169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-384-9

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten

133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-385-6

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings

177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-386-3

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aushärtbarer Aluminiumlegierungen

137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-387-0

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven

138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-388-7

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung

154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-391-7

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge

166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-392-4

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge

164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-393-1

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren

170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-394-8

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten

156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-395-5

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma

136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-396-2

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen

136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-397-9

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen

169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-398-6

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates

158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-399-3

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung

188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-401-3

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene

157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tabellen 2015.

ISBN 978-3-87525-402-0

Band 279: Fabian Zöllner

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation

126 Seiten, 63 Bilder, 3 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-403-7

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen

147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-404-4

Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmekanische Simulation

177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-405-1

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik

160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-406-8

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse

155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-407-5

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht

118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-408-2

Band 285: Martin Bornschlegl

Methods-Energy Measurement - Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau

136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-409-9

Band 286: Tobias Rackow

Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie

164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-410-5

Band 287: Johannes Koch

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung

125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-411-2

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann

Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces

174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-412-9

Band 289: Thomas Senner

Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden

156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-414-3

Band 290: Sven Kreitlein

Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion

185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tabellen 2016.

ISBN 978-3-87525-410-5