

Universität Stuttgart

IER Institut für Energiewirtschaft
und Rationelle Energieanwendung

Forschungsbericht

Integrierte Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen

Eine modellgestützte Analyse am Beispiel von
Querschnittstechnologien

Roman Flatau

Integrierte Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen

Eine modellgestützte Analyse am Beispiel von Querschnittstechnologien

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von

Roman Flatau

geboren in Osnabrück

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen
Mitberichter: Prof. Dr. rer. pol. Valentin Bertsch

Tag der Einreichung: 28.01.2019
Tag der mündlichen Prüfung: 11.07.2019

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
Prof. Dr.-Ing. Kai Hufendiek
Abteilung Effiziente Energienutzung (EE)
Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen

2019

ISSN 0938-1228

D93 (Dissertation der Universität Stuttgart)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Effiziente Energienutzung am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen für die Betreuung meiner Forschungsarbeit, die konstruktiven Anregungen und Diskussionen sowie die vertrauensvolle Zusammenarbeit, die zum erfolgreichen Abschluss dieser Forschungsarbeit geführt haben. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. rer. pol. Valentin Bertsch herzlich für die Übernahme des Mitberichts.

Des Weiteren danke ich dem Leiter des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Prof. Dr.-Ing. Kai Hufendiek, für den fachlichen Austausch und die konstruktiven Diskussionen. Ebenso danke ich meinem ehemaligen Abteilungsleiter Dr. rer. pol. Ulrich Fahl sowie PD Dr.-Ing. Markus Blesl für die gute Zusammenarbeit und den fachlichen Austausch während meiner Zeit in der Abteilung Energiewirtschaft und Systemtechnische Analyse.

Weiterhin möchte ich mich insbesondere bei meinen Kollegen Dr.-Ing. Thomas Haasz, Benjamin Fleischer, Dr.-Ing. Jean-Christian Brunke und Nikolai Klempp für die vielen konstruktiven Diskussionen und Hinweise sowie die kritische Durchsicht meiner Forschungsarbeit bedanken.

Außerdem danke ich Dr.-Ing. Stefan Wolf, Nils Seckinger, Michael Miller, Michael Wiesmeth, Dr.-Ing. Steffen Bubeck sowie allen weiteren Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung für die angenehme Atmosphäre und freundschaftliche Zusammenarbeit.

Ganz besonders danke ich auch meinen Eltern Gabriele und Andreas, meiner Schwester Sarah sowie meiner Nichte Hannah für die Unterstützung, den Rückhalt und die willkommenen Ablenkungen während meiner Promotion.

Stuttgart im Juli 2019

Roman Flatau

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Symbole, Indizes und Mengen	XV
Kurzfassung	XIX
Abstract	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	2
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	6
1.3 Struktur der Arbeit	9
2 Definitionen und Grundlagen	11
2.1 Definitionen	11
2.1.1 Energiewirtschaftliche Termini	11
2.1.2 Querschnittstechnologien	14
2.2 Klassifizierung mathematischer Energiemodelle	15
2.2.1 Zielsetzung	18
2.2.2 Systemgrenze	18
2.2.3 Modellstruktur	21
2.2.4 Mathematische Modellbeschreibung	22
3 Stand der Forschung	27
3.1 Methoden zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen	27
3.1.1 Ökonomische Bewertung	27
3.1.2 Energetische Bewertung	28
3.1.3 Kostenpotenzialkurven	30
3.2 Einordnung bisheriger Forschungsarbeiten	33
3.3 Limitierungen bisheriger Bewertungsverfahren	36

4	Methodische Weiterentwicklung der Bewertungsverfahren	45
4.1	Modellbasierte Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen.....	46
4.2	Heuristischer Optimierungsalgorithmus.....	51
4.3	Ökonomische Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen	57
5	Konzeption des Energienachfragemodells.....	63
5.1	Modelltopologie.....	63
5.1.1	Typbetrieb-Ansatz.....	63
5.1.2	Zeitliche Auflösung.....	65
5.2	Mathematische Spezifikationen.....	66
5.2.1	Herleitung synthetischer Lastprofile der Energienachfrage.....	67
5.2.2	Modellierung der Energieversorgung.....	69
5.2.3	Kopplung der Energienutzung und -versorgung	75
5.3	Modellparametrierung	76
5.3.1	Technologiebestand.....	76
5.3.2	Energieeffizienzmaßnahmen	77
5.4	Plausibilisierung	78
5.4.1	Dokumentation der Rahmenannahmen	80
5.4.2	Technologiemodellierung.....	82
5.4.3	Bewertungsverfahren	85
6	Potenzialanalyse für Querschnittstechnologien in der Kunststoffver-	
	arbeitung.....	89
6.1	Kunststoffverarbeitende Industrie.....	89
6.1.1	Charakterisierung der Branche.....	90
6.1.2	Beschreibung der Produktionsprozesse.....	91
6.1.3	Definition von Typbetrieben	97
6.2	Daten und Rahmenannahmen	101
6.2.1	Definition der Szenarien.....	101
6.2.2	Rahmenannahmen der Sensitivitätsanalyse	104
6.3	Energieeffizienzpotenziale.....	105

6.3.1	Potenziale nach Produktgruppen auf Basis von Typbetrieben	105
6.3.2	Potenziale der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland.....	119
6.4	Sensitivitätsanalyse	128
7	Abschließende Betrachtung	133
7.1	Methodische Weiterentwicklungen.....	133
7.2	Energieeffizienzpotenziale für Querschnittstechnologien in der Kunst- stoffverarbeitung	137
7.3	Weiterer Forschungsbedarf	138
7.4	Schlusswort	139
8	Literaturverzeichnis	141
A.	Anhang: Kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland	171
B.	Anhang: Daten und Rahmenannahmen	177
C.	Anhang: Weiterführende Ergebnisse	187

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Vergleich der Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland seit 2008 inklusive linearer Trendfortschreibung (basierend auf der Entwicklung von 2008 bis 2016) bis 2020 und 2050 mit dem angestrebten Entwicklungspfad.....	4
Abbildung 1-2:	Vergleich der Entwicklung der Endenergieproduktivität, des Endenergieverbrauchs sowie des BIP (bereinigt) in Deutschland seit 2008 inklusive linearer Trendfortschreibung (basierend auf der Entwicklung von 2008 bis 2016) bis 2050 mit dem angestrebten Entwicklungspfad	5
Abbildung 1-3:	Struktur der Arbeit.....	9
Abbildung 2-1:	Bewertungsrahmen zur Klassifizierung mathematischer Energiemodelle	17
Abbildung 2-2:	Schematische Darstellung unterschiedlicher Aggregationsniveaus von Energiemodellen.....	22
Abbildung 3-1:	Schematische Darstellung einer Energieeinsparangebotskurve (CSC).....	31
Abbildung 3-2:	Schematische Darstellung einer Energieeinsparkostenkurve (EEKK).....	33
Abbildung 4-1:	Schematische Darstellung der hierarchischen Struktur eines Verbundsystems	47
Abbildung 4-2:	Schematische Darstellung der Aggregation von zwei Prozessschritten zu einer Prozessgruppe	49
Abbildung 4-3:	Systematik der Verbindung unterschiedlicher Prozessschritte durch Flüsse.....	50
Abbildung 4-4:	Anzahl der Elementaroperationen in Abhängigkeit der Problemgröße n (logarithmische Ordinate).....	52
Abbildung 4-5:	Zuordnung der Energieeffizienzmaßnahmen am Beispiel der Druckluftherzeugung	54
Abbildung 4-6:	Schaubild des heuristischen Optimierungsalgorithmus.....	56
Abbildung 5-1:	Aggregierte RES-Darstellung des Energienachfragemodells	64
Abbildung 5-2:	Generische RES-Darstellung eines Typbetriebs	65

Abbildung 5-3:	Zeitliche Auflösung des Basisjahres.....	66
Abbildung 5-4:	Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise zur Herleitung synthetischer Lastprofile.....	67
Abbildung 5-5:	Schematische Darstellung zur Aggregation der Lastprofile zentraler Verbraucher sowie zur Umrechnung der zeitlichen Auflösung.....	69
Abbildung 5-6:	Generisches Kennfeld einer Kreiselpumpe.....	72
Abbildung 5-7:	Schematische Darstellung zur Berechnung des relativen Wirkungsgrads in Abhängigkeit der relativen Förderhöhe respektive des relativen Volumenstroms durch lineare Interpolation zwischen den Stützpunkten	72
Abbildung 5-8:	Wirkungsgrad- und Kostenfunktion der spez. Investition (inkl. Montage) für Elektromotoren der Effizienzklasse ‚BVT‘ (Referenztechnologie: IE4-Asynchronmotor gemäß IEC 60034-30-1).....	78
Abbildung 5-9:	Exemplarische Darstellung der Ergebnisse der Modellplausibilisierung in Form eines Boxplots	83
Abbildung 5-10:	Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Elektromotoren.....	84
Abbildung 5-11:	Boxplots der Variantenrechnungen für die Einzelbewertung, die statisch-faktorielle und die integrierte Bewertung.....	86
Abbildung 5-12:	Histogramme der Variantenrechnungen für die Einzelbewertung (links), die statisch-faktorielle Bewertung (Mitte) sowie die integrierte Bewertung (rechts)	87
Abbildung 6-1:	Rohrextrusion (Schema)	92
Abbildung 6-2:	Flachfolienextrusion (Schema)	93
Abbildung 6-3:	Blasfolienextrusion (Schema).....	93
Abbildung 6-4:	Spritzgießen (Schema).....	94
Abbildung 6-5:	Extrusionsblasformen (Schema)	95
Abbildung 6-6:	Streckblasformen (Schema).....	96
Abbildung 6-7:	Thermoformen (Schema).....	96

Abbildung 6-8:	Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 1 zur Herstellung von Stäben, Stangen und Rohren im Extrusionsverfahren in Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario	107
Abbildung 6-9:	Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 2 zur Herstellung von Folien durch Schlauch- und Flachfolienextrusion in Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario	109
Abbildung 6-10:	Einsatz der An-/Ausregelung am Beispiel eines zwölfminütigen Bedarfsprofils (48 aggregierte 15-Sekunden-Intervalle) für den Typbetrieb 2 im Trendszenario	110
Abbildung 6-11:	Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 3 zur Herstellung von Verpackungen durch Thermoformen, Spritzguss und Extrusionsblasformen in Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario	112
Abbildung 6-12:	Wärmerückgewinnung aus Druckluftanlagen zur Bürogebäudeheizung für KW 1 (Januar).....	112
Abbildung 6-13:	Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 4 zur Herstellung von Flaschen im Extrusions- und Spritzblasformen in Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario	114
Abbildung 6-14:	Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 5 zur Herstellung von Baubedarf im Spritzguss- und Extrusionsverfahren in Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario	116
Abbildung 6-15:	Einsatz der freien Kühlung (unten) in Abhängigkeit der Außentemperatur (oben) für KW 20.....	117
Abbildung 6-16:	Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 6 zur Herstellung von technischen Teilen im Spritzgussverfahren in Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario.....	118
Abbildung 6-17:	Spezifisches wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial der Typbetriebe im Trendszenario sowie im positiven und negativen Extremszenario für das Basisjahr 2015	122
Abbildung 6-18:	Energieeinsparkostenkurve der sechs charakteristischen Typbetriebe für Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario sowie das positive und negative Extremszenario	125

Abbildung 6-19:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 2 zur Herstellung von Folien durch Schlauch- und Flachfolienextrusion in Deutschland im Jahr 2015 im Vergleich zum Trendszenario.....	130
Abbildung C-1:	Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Elektromotoren.....	187
Abbildung C-2:	Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Ventilatoren	187
Abbildung C-3:	Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Pumpen.....	188
Abbildung C-4:	Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Druckluft	188
Abbildung C-5:	Ergebnisse der Modellplausibilisierung für die Kälteerzeugung.....	189
Abbildung C-6:	Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Raumwärmebereitstellung in Gebäuden.....	189
Abbildung C-7:	Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Beleuchtung.....	189
Abbildung C-8:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 1 zur Herstellung von Rohren	214
Abbildung C-9:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 2 zur Herstellung von Folien.....	214
Abbildung C-10:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 3 zur Herstellung von Verpackungen.....	215
Abbildung C-11:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 4 zur Herstellung von Flaschen.....	215
Abbildung C-12:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 5 zur Herstellung von Baubedarf	216
Abbildung C-13:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 6 zur Herstellung von technischen Teilen.....	216

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Quantitative Energieeffizienzziele der Energiewende und Status quo (2016)	3
Tabelle 2-1:	Ausgewählte Definitionen des Begriffs der Querschnittstechnologien	15
Tabelle 3-1:	Vor- und Nachteile von Verfahren zur Quantifizierung des Energieeinsparpotenzials von Energieeffizienzmaßnahmen	29
Tabelle 3-2:	Einordnung ausgewählter Forschungsarbeiten zur modellbasierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen im industriellen Kontext	35
Tabelle 4-1:	Zusammenfassung der Modelleigenschaften zur integrierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen.....	45
Tabelle 5-1:	Zusammenfassung der implementierten Energieeffizienzmaßnahmen für Pumpensysteme.....	74
Tabelle 5-2:	Zusammenfassung ausgewählter Determinanten der Parametervariationen der Querschnittstechnologien	81
Tabelle 5-3:	Ergebnisse der Variantenrechnungen für die Einzelbewertung, die statisch-faktorielle und die integrierte Bewertung	85
Tabelle 6-1:	Industrieanalyse der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland im Jahr 2015	90
Tabelle 6-2:	(Spezifischer) Endenergieverbrauch der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland im Jahr 2015.....	91
Tabelle 6-3:	Zusammenfassung ausgewählter Studien und Berichte zur Definition charakteristischer Typbetriebe	98
Tabelle 6-4:	Übersicht der Primärdatenerhebungen in der identifizierten Sekundärliteratur	99
Tabelle 6-5:	Charakteristische Typbetriebe der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland.....	99
Tabelle 6-6:	Zusammenfassung der wesentlichen Parameter für die Szenarioanalyse	103
Tabelle 6-7:	Zusammenfassung der Parameter für die Sensitivitätsanalyse.....	104

Tabelle 6-8:	Auswertung ausgewählter Kennzahlen der Typbetriebe (inkl. Vergleichswerten).....	120
Tabelle 6-9:	Vergleich des ermittelten wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials mit den Ergebnissen einer Einzelbewertung für das Trendszenario	123
Tabelle 6-10:	Wirtschaftliches und technisches Endenergieeinsparpotenzial der im Rahmen der Szenarioanalyse betrachteten Wirtschaftszweige der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland	124
Tabelle 6-11:	Potenzial zur Kostenreduktion der Typbetriebe durch Umsetzung aller im Trendszenario als wirtschaftlich identifizierten Energieeffizienzmaßnahmen	126
Tabelle 6-12:	Korrelation der im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersuchten Parameter mit dem wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzial für die Typbetriebe der kunststoffverarbeitenden Industrie.....	129
Tabelle 6-13:	Endenergieeinsparpotenzial und Energiekostenreduktion des Typbetriebs 2 für das Trendszenario sowie die Sensitivitäten.....	131
Tabelle 7-1:	Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der untersuchten Bewertungsverfahren	136
Tabelle A-1:	Berechnung des verarbeiteten Kunststoffgranulats [1.000 t] in der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland im Jahr 2015 auf 6-Steller-Ebene der Wirtschaftszweige	171
Tabelle A-2:	Anteil der Wirtschaftszweige auf 6-Steller-Ebene am Endenergieverbrauch auf 4-Steller-Ebene	172
Tabelle A-3:	Endenergieverbrauch der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland im Jahr 2015 auf 6-Steller-Ebene (berechnet aus 9-Steller).....	173
Tabelle A-4:	Kunststoffpolymere und deren Verarbeitung ¹⁾	174
Tabelle A-5:	Definition charakteristischer Typbetriebe für die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland	175
Tabelle B-1:	Angenommene Technologiebestandsstruktur der Typbetriebe ¹⁾	177
Tabelle B-2:	Jahresdurchschnittswerte der Preisindizes der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Fachserie 17, Reihe 2).....	178
Tabelle B-3:	Umrechnungskurse ausgewählter Währungen bezogen auf EUR	178

Tabelle B-4:	Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Elektromotoren ¹⁾	179
Tabelle B-5:	Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Pumpensystemen ¹⁾	180
Tabelle B-6:	Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Ventilatorensystemen ¹⁾	181
Tabelle B-7:	Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Druckluftsystemen ¹⁾	182
Tabelle B-8:	Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Kälteanlagen ¹⁾	183
Tabelle B-9:	Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Heizungsanlagen ¹⁾	184
Tabelle B-10:	Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Beleuchtungsanlagen ¹⁾	184
Tabelle B-11:	Energieträgerpreisentwicklung der Typbetriebe der kunststoffverarbeitenden Industrie im Trendszenario sowie im positiven und negativen Extremszenario (inkl. aller Steuern und Abgaben, exkl. Mehrwertsteuer) von 2015 bis 2035 [EUR-ct/kWh]	185
Tabelle C-1:	Gewichtete spezifische Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten	190
Tabelle C-2:	Energieeinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten	192
Tabelle C-3:	Gewichtete spezifische Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten	194
Tabelle C-4:	Energieeinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten	196
Tabelle C-5:	Gewichtete spezifische Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten	198
Tabelle C-6:	Energieeinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten	200

Tabelle C-7:	Gewichtete spezifische Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten.....	202
Tabelle C-8:	Energieeinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten.....	204
Tabelle C-9:	Gewichtete spezifische Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten.....	206
Tabelle C-10:	Energieeinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten.....	208
Tabelle C-11:	Gewichtete spezifische Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten.....	210
Tabelle C-12:	Energieeinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten.....	212

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
Äq.	Äquivalente
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BVT	Beste verfügbare Technologie
CCE	Energievermeidungskosten (engl. <i>cost of conserved energy</i>)
CMI	Clay Mathematics Institute
COP	Weltklimakonferenz (engl. <i>Conference of the Parties</i>)
CSC	Energieeinsparangebotskurven (engl. <i>conservation supply curves</i>)
DE	Deutschland
DENA	Deutsche Energie-Agentur
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
E2M2s	European Electricity Market Model
EBW	Einzelbewertung
EEKK	Energieeinsparkostenkurven (engl. <i>energy conservation cost curves</i>)
EEM	Energieeffizienzmaßnahme
EEP	Energieeinsparpotenzial
EEV	Endenergieverbrauch
ESP	Spanien
EU	Europäische Union
ff.	Auf den nächsten Seiten
FU	Frequenzumrichter
GAMS	General Algebraic Modeling System
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GWP	Globales Erwärmungspotenzial (engl. <i>global warming potential</i>)
HEV	Heizenergieverbrauch
i. A. a.	In Anlehnung an
i. F.	Im Folgenden
IEA	Internationale Energieagentur (engl. <i>International Energy Agency</i>)
IER	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JMM	Joint Market Modell
KW	Kalenderwoche
LCS	Optimaler Investitionsplan (engl. <i>least-cost schedule</i>)
MACC	CO ₂ -Vermeidungskostenkurven (engl. <i>marginal abatement cost curves</i>)
MAED-2	Model for Analysis of Energy Demand
MATLAB	MATrix LABoratory

Abkürzung	Bedeutung
Mesap PlaNet	Modular Energy System Analysis and Planning Network
M-SEC	Maschinenspezifischer Energieverbrauch (engl. <i>machine-specific energy consumption</i>)
NAPE	Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz
NEWAGE-Modell	National European Worldwide Applied General Equilibrium Modell
<i>NP</i>	Nichtdeterministisch polynomielle Zeit
<i>NP-C'</i>	<i>NP</i> -vollständig
NPV	Kapitalwert (engl. <i>net present value</i>)
NWOM	Mund-zu-Mund-Propaganda (engl. <i>negative word of mouth</i>)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
<i>P</i>	Deterministisch polynomielle Zeit
PA	Polyamid
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonate
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte (engl. <i>high density</i>)
PE-LD	Polyethylen geringer Dichte (engl. <i>low density</i>)
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen
PS	Polystyrol
P-SEC	Produktspezifischer Energieverbrauch (engl. <i>product-specific energy consumption</i>)
PVC	Polyvinylchlorid
RES	Referenzenergiesystem
s./S.	Siehe
S.	Seite
SBS	Styrol-Butadien-Styrol-Copolymere
SEEK	Spezifische Energieeinsparkkosten
S-SEC	Standortspezifischer Energieverbrauch (engl. <i>site-specific energy consumption</i>)
TIMES	The Integrated MARKAL-EFOM System
TIMES PanEU	Pan-Europäisches TIMES Energiesystemmodell
TRNSYS	Transient Systems Simulation
ugs.	Umgangssprachlich
u. v. a. m.	Und viele[s] andere [mehr]
UK	Vereinigtes Königreich Großbritannien (engl. <i>United Kingdom</i>)
USA	Vereinigten Staaten von Amerika (engl. <i>United States of America</i>)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WACC	Gewichtete Kapitalkosten (engl. <i>weighted average cost of capital</i>)
WEM	World Energy Model
WZ	Wirtschaftszweig

Symbole, Indizes und Mengen

Symbole	Einheit	Bedeutung
a	-	Binäre Variable: $a = \begin{cases} 1 & \text{CO}_2\text{-Zertifikatehandel} \\ 0 & \text{Kein CO}_2\text{-Zertifikatehandel} \end{cases}$
α	-	Vektor zur Identifikation eines Verbundsystems
A	EUR/a	Annuität
AF	1/a	(Vorschüssiger) Annuitätenfaktor
AUS	%	Auslastung der Produktionsanlage
AZ	EUR/a	Auszahlung
b_1 bis b_5	-	Faktoren der generischen Pumpenkennlinie
β	-	Vektor zur Identifikation einer Verfahrensstufe
$CAPEX$	EUR/a	Kapitalgebundene Kosten
CCE	EUR/MWh; EUR/GJ	Energievermeidungskosten
d	-	Kalkulatorischer Zinssatz/Diskontierungsrate
δ	-	Vektor zur Identifikation einer Prozessgruppe
ε	-	Vektor zur Identifikation eines Prozessschritts
E	kWh; MWh; GJ	Energie
EEP	MWh/a; GJ/a; %	(End-)Energieeinsparung/(End-)Energieeinsparpotenzial
EEV	MWh/a; GJ/a	Endenergieverbrauch
EIR	MWh/t; GJ/t	Energieintensitätsreduktion
EZ	EUR/a	Einzahlung
f	generisch	Emissionsfaktor
g	m/s ²	Gewichtskraft
γ	-	Vektor zur Identifikation eines Verfahrensschritts
Γ	generisch	Ausgangsseitige Güterflüsse
H	m	Förderhöhe
I	EUR	Investition
J	#	Anzahl der ausgangsseitigen Güterflüsse
KAP	t/a	Kapazität der Produktionsanlage
L	EUR	Restwert zum Zeitpunkt T
LCS	EUR/a	Optimaler Investitionsplan
M	EUR	Ausgaben für Montage
η	%	Wirkungsgrad
NPV	EUR	Kapitalwert
ΔOaM	EUR/a	Veränderung der Betriebskosten
$\Delta OPEX$	EUR/a	Veränderung der variablen Kosten
Ω	generisch	Eingangsseite Güterflüsse
P	W; kW; MW	Leistung
p	generisch	Preis

Symbole	Einheit	Bedeutung
Q	$\text{m}^3/\text{s}; \text{m}^3/\text{min}$	Volumenstrom
Ψ	generisch	Technische Daten
r	-	Korrelationskoeffizient
ρ	kg/m^3	Dichte
S	-	Hierarchieebene
SEC	$\text{MWh}/\text{t}; \text{GJ}/\text{t}$ kWh/kg	Spezifischer (End-)Energieverbrauch
$SEEK$	$\text{EUR}/\text{MWh};$ EUR/GJ	Spezifische Energieeinsparkosten
\overline{SEEK}	$\text{EUR}/\text{MWh};$ EUR/GJ	Gewichteter Mittelwert der spezifischen Energieeinsparkosten
$T; T^N$	a	(Länge des) Betrachtungszeitraum; Nutzungsdauer
$\Delta TOTEX$	EUR/a	Veränderung der jährlichen Gesamtkosten
w	-	Paarweiser Korrekturfaktor zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen
ψ	generisch	Umrechnungsfaktor zur Berücksichtigung der unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen
Z	EUR/a	Zahlungsstrom

Indizes	Bedeutung
B	Betrieb
BP	Nennbetriebspunkt
CO_2	CO_2 -Zertifikate
e	Endenergieträger
EEM_i	Energieeffizienzmaßnahme
EEP	(End-)Energieeinsparpotenzial
EL	Elektrisch
END	Ende
FU	Drehzahlregelung (Frequenzumrichter)
h	Generischer Index der Gleichungen mit $h \in \mathbb{N}\{1, \dots, H\}$
H	Förderhöhe
$HEAT$	Raumwärmebedarf
$HEAT_RES$	Residualer Raumwärmebedarf
i	Generischer Index der Gleichungen mit $i \in \mathbb{N}\{1, \dots, I\}$
j	Generischer Index der Gleichungen mit $j \in \mathbb{N}\{1, \dots, J\}$
$KÜ$	Kraftübertragung
L	(Wirkungsgrad-)Verluste
ME	Mechanisch
η	Wirkungsgrad
NEG	Negative spezifische Energieeinsparkosten
$ÖKO$	Ökonomisch
p_{EEM_i}	Position der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i in der Umsetzungshierarchie
PG	Prozessgruppe

Indizes	Bedeutung
PG_j	Prozessgruppe
POS	Positive spezifische Energieeinsparkosten
PS	Prozessschritt
PU	Pumpe
Q	Volumenstrom
$START$	Start/Anfang
t	Zeitpunkt im Zeitintervall/Betrachtungszeitraum
τ	Simulationsschritt im Zeitintervall/Betrachtungszeitraum
UH	Umsetzungshierarchie
VG	Verfahrensstufe
VS	Verbundsystem
VT	Verfahrensschritt
$WASTE$	Verfügbare Abwärme

Mengen

\mathbb{N}	Natürliche Zahlen mit $\mathbb{N} = \{1; 2; 3; \dots\} \subset \mathbb{R}^+$
\mathbb{Q}^+	Rationale Zahlen mit $\mathbb{Q}^+ = \{0; \frac{1}{2}; 5\frac{3}{8}; 0, \bar{6}; \dots\} \subset \mathbb{R}^+$
\mathbb{R}^+	Reelle Zahlen mit $\mathbb{R}^+ = \{\pi; e; \sqrt{2}; +\frac{1}{2}; \dots\} \subset \mathbb{R}$
\mathbb{R}	Reelle Zahlen mit $\mathbb{R} = \{\pi; e; \sqrt{2}; \pm\frac{1}{2}; \dots\}$
\tilde{E}	Alle betrachteten Endenergieträger
\tilde{S}^{PG}	Alle betrachteten Prozessgruppen
\tilde{S}^{PS}	Alle betrachteten Prozessschritte
\tilde{S}^{VG}	Alle betrachteten Verfahrensstufen
\tilde{S}^{VS}	Alle betrachteten Verbundsysteme
\tilde{S}^{VT}	Alle betrachteten Verfahrensschritte
\tilde{S}^{P-VS}	Alle Prozessgruppen im Verbundsystem
Θ	Simulationsschritte im Betrachtungszeitraum

Kurzfassung

Die Energieeffizienz ist eine der Säulen der deutschen Energiewende. Ein Problem ist, dass die in Studien als wirtschaftlich identifizierten Energieeffizienzpotenziale nicht in Gänze realisiert werden. Als Grund werden u. a. fehlerhafte Potenzialanalysen infolge der unzureichenden Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen diskutiert. Daher wird in dieser Arbeit die Rolle von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen bei der Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen im industriellen Kontext analysiert.

Im **ersten Teil dieser Arbeit** werden einleitend bestehende Limitierungen bei der Bewertung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen diskutiert. Darauf aufbauend wird ein Verfahren zur adäquaten Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt (i. F. integrierte Bewertung). Dieses wird als Bottom-up-Energienachfragemodell mit modular-hierarchischer Struktur und nicht linearer Programmierung am Beispiel von Querschnittstechnologien in MATLAB umgesetzt. Die integrierte Bewertung kombiniert die endogene Berechnung des Endenergieeinsparpotenzials mit einem heuristischen Optimierungsansatz. Ferner ermöglicht das Energienachfragemodell die Berücksichtigung der heterogenen Ausprägung des Anlagenbestands, der unterschiedlichen Lastzustände einzelner Verbraucher sowie der Wechselwirkungen zwischen Technologien und Energieeffizienzmaßnahmen.

Die Eignung bestehender Methoden sowie der integrierten Bewertung wird mittels vergleichender Analyse von je 720 Variantenrechnungen am Beispiel von Querschnittstechnologien bewertet. Durch die quantitativen Ergebnisse wird evident, dass eine Vernachlässigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen zu signifikanten Fehleinschätzungen bei der Potenzialanalyse führt. Dahingegen liefern bestehende Approximationsalgorithmen auf aggregierter Ebene plausible Ergebnisse, während Aussagen zu individuellen Energieeffizienzmaßnahmen kritisch zu hinterfragen sind. Die integrierte Bewertung ermöglicht sowohl auf aggregierter Ebene als auch zu einzelnen Energieeffizienzmaßnahmen plausible Aussagen.

Im **zweiten Teil dieser Arbeit** wird das entwickelte Energienachfragemodell im Rahmen einer Potenzialanalyse für Querschnittstechnologien am Beispiel der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland angewandt. Für die betrachteten Querschnittstechnologien wird ein durch eine gesteigerte Energieeffizienz induziertes wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial von 1.384 GWh bzw. 0,17 kWh/kg bezogen auf die Güterproduktion identifiziert. Dabei weist u. a. die Optimierung der Kälteversorgung signifikante wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenziale auf. Im Rahmen der Potenzialanalyse konnte speziell die freie Kühlung als ‚no-regret-Maßnahme‘ identifiziert werden. Im Hinblick auf die formulierte Zielsetzung dieser Arbeit wird vor allem der Einfluss von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen analysiert. Durch die Vernachlässigung dieser Wechselwirkungen wird das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial um ein Drittel überschätzt.

Abstract

Energy efficiency plays a major role in the German energy transition. Several scientific studies demonstrate that there are still significant economic energy efficiency potentials. Due to various reasons, the realised energy efficiency potential is considerably lower than the identified economic energy efficiency potential. One possible reason is not or falsely accounting for the interactions between energy efficiency measures when evaluating energy efficiency potentials. Therefore, this thesis analyses the role of interactions between energy efficiency measures when evaluating energy efficiency potentials in an industrial context.

The **first section of this thesis** discusses existing limitations in the evaluation of interactions between energy efficiency measures. Based on this, a method for the adequate evaluation of interdependent energy efficiency measures is developed (referred to as integrated assessment). This method is implemented in a technology-oriented bottom-up energy demand model using a modular hierarchical structure and non-linear programming. The scope of the model is the evaluation of energy efficiency measures for cross-cutting technologies. The integrated assessment combines an endogenous calculation of the energy savings potential with a heuristic optimisation approach. Furthermore, it is possible to consider the heterogeneity of the technological equipment, the operating status, and the interactions between technologies and energy efficiency measures. The energy demand model was implemented in MATLAB.

The suitability of the existing methods as well as the integrated assessment was evaluated using a comparative analysis of 720 different variants for the example of cross-cutting technologies. The quantitative results demonstrated that neglecting interactions between energy efficiency measures leads to significant misinterpretations when evaluating energy efficiency potentials. In addition, existing approximation algorithms provide plausible results on an aggregated level, while assertions about individual energy efficiency measures need to be examined critically. When using the integrated assessment approach, it is possible to make plausible statements both on an aggregated level and in terms of individual energy efficiency measures.

In the **second section of this thesis**, the developed energy demand model is used for a potential analysis of the German plastics processing industry. For the considered cross-cutting technologies, an economic final energy saving potential due to an increased energy efficiency of 1,384 GWh (or 0.17 kWh/kg based on the production of goods) was identified. Among other things, the optimisation of the refrigeration supply system offers significant economic final energy savings. The free cooling in particular was identified as a ‘no-regret measure’. With regard to the formulated objective of this thesis, the influence of interactions between energy efficiency measures was analysed in particular. By neglecting interactions between energy efficiency measures, the economic final energy saving potential is overestimated by one third.

1 Einleitung

Die heutige Debatte zur Energiewende¹ in Deutschland hat ihren historischen Ursprung in der Klimaforschung des 19. Jahrhunderts.² Bereits 1827 beschrieb der französische Mathematiker und Physiker Jean-Baptiste Joseph Fourier den Einfluss der Atmosphäre auf die Erdoberflächentemperatur. In seinem Werk *GENERAL REMARKS ON THE TEMPERATURE OF THE TERRESTRIAL GLOBE AND THE PLANETARY SPACES* schrieb Fourier: „It is difficult to know how far the atmosphere influences the mean temperature of the globe; and in this examination we are no longer guided by a regular mathematical theory“ (Fourier 1827 übersetzt von Burgess 1837). Etwa 70 Jahre später führte der schwedische Physiker und Chemiker Svante August Arrhenius Berechnungen zum Einfluss der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf die Erdoberflächentemperatur durch (Arrhenius 1896). Im Zuge dessen stellte Arrhenius (1896) einen Zusammenhang zwischen den durch den Menschen verursachten Treibhausgasemissionen der modernen Industrie und der Zusammensetzung der Erdatmosphäre her. Zunächst wurden die Ergebnisse von Arrhenius in der Wissenschaft aus diversen Gründen kritisiert. So wurden beispielsweise die von Arrhenius durchgeführten Berechnungen des Klimasystems aufgrund der Vielzahl der getroffenen Vereinfachungen in ihrer Robustheit infrage gestellt (Weart 2008).

Mitte des 20. Jahrhunderts wurde eine zunehmende Erwärmung des globalen Klimasystems beobachtet. Im Zeitraum von 1901 bis 2011 stieg die globale Temperatur in Bodennähe um ca. 0,8 °C an, wobei ca. zwei Drittel der Erwärmung dem Zeitraum von 1970 bis 2011 zuzuordnen sind (Umweltbundesamt 2013). Infolgedessen wird seit den 1970/80er Jahren über den Einfluss anthropogener, d. h. menschengemachter, Klimaänderungen diskutiert (Weart 2008). Aufgrund der komplexen Zusammenhänge des Klimasystems konnte die Klimaerwärmung bis heute nicht mit hundertprozentiger Sicherheit auf die erhöhte Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre zurückgeführt werden (Umweltbundesamt 2016). Dennoch herrscht in der Klimaforschung hinsichtlich der Bedeutung der anthropogenen Klimaänderungen weitestgehend Einigkeit (Umweltbundesamt 2013). Beispielsweise wertete Oreskes (2004) 928 Studien zu globalen Klimaänderungen zwischen 1993 und 2003 aus. Nicht eine der bewerteten Studien widerspricht dem anthropogenen Klimawandel (Oreskes 2004). Anderegg et al. (2010) bestätigten auf Basis einer Analyse der Forschungsarbeiten von 1.372 aktiven Klimaforschern die Ergebnisse von Oreskes (2004). Etwa 97 % der Klimaforscher ordnen die Klimaerwärmung zweifelsfrei den anthropogenen Treibhausgasemissionen zu (Anderegg et al. 2010). Der Weltklimarat (engl. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) fasste den aktuellen Stand

¹ Die Energiewende beschreibt die Transformation der Energieversorgung hin zu mehr erneuerbaren Energien und mehr Energieeffizienz bei gleichzeitigem Verzicht auf fossile und nukleare Energieträger (bpb 2018).

² Eine ausführliche Beschreibung der Geschichte der Klimaforschung ist in *THE DISCOVERY OF GLOBAL WARMING* von Spencer R. Weart (2008), US-amerikanischer Wissenschaftshistoriker, zu finden.

der Klimaforschung wie folgt zusammen: „Es ist äußerst wahrscheinlich, dass mehr als die Hälfte des beobachteten Anstiegs der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur von 1951 bis 2010 durch den anthropogenen Anstieg der Treibhausgaskonzentration zusammen mit anderen anthropogenen Antrieben verursacht wurde“ (IPCC 2014). Dabei wird von einer Wahrscheinlichkeit von 95–100 % ausgegangen (IPCC 2014).

1.1 Hintergrund

Um die „[...] Wahrscheinlichkeit von schwerwiegenden, weitverbreiteten und irreversiblen Folgen für Menschen und Ökosysteme [...]“ (IPCC 2014) aufgrund anthropogener Einflüsse auf die Klimaerwärmung zu mindern, wurde im Mai 1992 die UN-Klimarahmenkonvention (engl. *United Nations Framework Convention on Climate Change*) verabschiedet (United Nations 1992). Gemäß Artikel 2 verfolgt die UN-Klimarahmenkonvention das Ziel, die Treibhausgaskonzentration der Atmosphäre auf ein Niveau zu reduzieren, das gefährliche Einflüsse auf das Klimasystem verhindert (United Nations 1992). Die UN-Klimarahmenkonvention trat im März 1994 in Kraft und wurde bis heute³ von 165 der 197 Vertragsstaaten ratifiziert (United Nations 2017b). Seit Inkrafttreten fanden 24 Weltklimakonferenzen (engl. *Conference of the Parties*, COP) statt.³ Ein Ergebnis der COP-3 ist das von 2005 bis 2012 gültige Kyoto-Protokoll zur völkerrechtlich verbindlichen Regelung der globalen Klimaschutzpolitik (United Nations 1998). Im Jahr 2015 wurde der Folgevertrag, das Pariser Klimaabkommen, auf der COP-21 in Paris von 197 Vertragsstaaten unterzeichnet. Seither haben 184 Staaten das Klimaabkommen ratifiziert (United Nations 2017a).^{3,4} Gemäß Artikel 2, Punkt 1.a verfolgt das Pariser Klimaabkommen das Ziel, den globalen durchschnittlichen Temperaturanstieg auf unter 2 °C, bezogen auf das vorindustrielle Niveau, zu reduzieren (United Nations 2015). Der Weltklimarat untersucht die Eigenschaften unterschiedlicher Treibhausgasreduzierungspfade sowie deren Implikationen auf die Klimaerwärmung im Verlauf des 21. Jahrhunderts. Mit Bezug auf das Pariser Klimaabkommen führe eine atmosphärische CO₂-Äquivalent-Konzentration⁵ (CO₂-Äq.) von 450 ppm im Jahr 2100 mit einer Wahrscheinlichkeit von 66–100 % zu einer Einhaltung des Zwei-Grad-Ziels (IPCC 2014). Die Internationale Energieagentur (engl. *International Energy*

³ Stand: Januar 2019.

⁴ Am 01. Juni 2017 erklärte der Präsident der Vereinigten Staaten von Amerika (engl. *United States of America*, USA), dass die USA aus dem Pariser Klimaabkommen zurücktreten werden. Mit einem Anteil von 15 % an den weltweiten CO₂-Emissionen sind die USA im Jahr 2014 der weltweit zweitgrößte Emittent hinter der Volksrepublik China mit einem Anteil von 30 %. Auf die EU-28 entfielen 9 % der weltweiten CO₂-Emissionen (Boden et al. 2017).

⁵ Die CO₂-Äquivalent-Konzentration beschreibt die Konzentration der klimawirksamen Treibhausgase (bspw. Kohlenstoffdioxid, Methan und Lachgas) in der Atmosphäre. Sie dienen als eine auf CO₂ normierte Maßeinheit. Mithilfe des globalen Erwärmungspotenzials (engl. *global warming potential*, GWP) wird die Klimawirksamkeit der Treibhausgase im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid ausgedrückt. Beispielsweise ist das globale Erwärmungspotenzial von Methan über den Zeitraum von 100 Jahren um das 28-Fache größer als das von Kohlenstoffdioxid (IPCC 2013).

Agency, IEA) bewertet die Folgen des Pariser Klimaabkommens auf die Entwicklung der zukünftigen weltweiten Energieversorgung im jährlich veröffentlichten WORLD ENERGY OUTLOOK (IEA 2017). Mit Blick auf das Zwei-Grad-Ziel (und somit einer maximalen Konzentration von 450 ppm CO₂-Äq. im Jahr 2100) trägt die Energieeffizienz in den Szenarien der IEA (2017) mit einem Anteil von 44 % den größten Anteil zur Minderung der CO₂-Emissionen bis 2040 bei. Weitere 36 % der CO₂-Emissionsminderung entfallen auf den Ausbau erneuerbarer Energien (IEA 2017).⁶ Zur Erreichung der deutschen und europäischen energie- und klimapolitischen Ziele hat die deutsche Bundesregierung ein auf drei Säulen basierendes Gesamtkonzept erarbeitet. Diese Säulen sind der Ausstieg aus der Kernenergie, die Steigerung der Energieeffizienz und der Einsatz eines hohen Anteils erneuerbarer Energien. Dieses Gesamtkonzept ist mit einer Reihe quantitativer Ziele verbunden. Tabelle 1-1 fasst die unterschiedlichen Energieeffizienzziele zusammen (BMWi 2018).

Tabelle 1-1: Quantitative Energieeffizienzziele der Energiewende und Status quo (2016)

Kategorie	Bezugsjahr	2016	Ziel			
			2020	2030	2040	2050
Primärenergieverbrauch ¹⁾	2008	-6,5 %	-20 %			-50 %
Endenergieproduktivität ^{1), 2)}	2008–2050	+1,1 %/a ³⁾		+2,1 %/a (2008 bis 2050)		
Bruttostromverbrauch ¹⁾	2008	-3,6 %	-10 %			-25 %
Primärenergiebedarf Gebäude ¹⁾	2008	-18,3 %				-80 %
Wärmebedarf Gebäude ¹⁾	2008	-6,3 %	-20 %			
Endenergieverbrauch Verkehr ¹⁾	2005	+4,2 %	-10 %			-40 %

¹⁾ (BMWi 2018).

²⁾ Endenergieproduktivität: Quotient aus Bruttoinlandsprodukt (BIP) und Endenergieverbrauch (EEV).

³⁾ Durchschnitt der Jahre 2008 bis 2016.

Diese Energieeffizienzziele berücksichtigen sowohl die Verbraucherseite als auch die Erzeugerseite. Beispielsweise ist eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs^{7,8} durch eine erhöhte Effizienz in den Nachfragesektoren, durch eine Steigerung der Effizienz in den Umwandlungssektoren und energiestatistisch⁹ durch die Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare

⁶ Angaben basierend auf dem Vergleich des ‚New Policies Scenario‘ mit dem ‚Sustainable Development Scenario‘. Das New Policies Scenario berücksichtigt alle gesetzlichen/regulatorischen Handlungsoptionen, die bereits umgesetzt oder noch nicht umgesetzt, aber bereits angekündigt wurden. Im Gegensatz dazu wird im Sustainable Development Scenario ein Zielszenario definiert, das durch unterschiedliche Handlungsoptionen erreicht werden kann. Eine ausführliche Beschreibung der Szenarien ist IEA (2017) zu entnehmen.

⁷ Energie kann nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ausschließlich umgewandelt, nicht aber erzeugt und auch nicht verbraucht werden (Baehr und Kabelac 2012). Da sich der Begriff ‚Energieverbrauch‘ im allgemeinen Sprachgebrauch etabliert hat, wird dieser – im Bewusstsein der sprachlichen Ungenauigkeit – auch im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet.

⁸ „Primärenergie ist der Energieinhalt von Energieträgern, die in der Natur vorkommen und technisch noch nicht umgewandelt wurden. Man unterscheidet zwischen den, an menschlichen Maßstäben gemessen, unerschöpflichen bzw. regenerativen, den fossilen und den nuklearen Energieträgern“ (VDI 2014).

⁹ Elektrischer Strom aus erneuerbaren Energien wird nach der Wirkungsgradmethode mit einem Wirkungsgrad von 100 % bilanziert. Im Vergleich beträgt bspw. der Wirkungsgrad der Kernenergie 33 % (BDEW 2015).

Energien möglich (BMWi 2014). Mit Blick auf die Entwicklung seit 2008 werden einige der gesetzten Ziele voraussichtlich nicht erreicht. So liegt Deutschland bereits im Jahr 2016 um 8,9 % über dem Entwicklungspfad zur Reduktion des Primärenergieverbrauchs bis 2020 und 2050 (AGEB 2018; BMWi 2014). Wird die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs von 2008 bis 2016 linear fortgeschrieben, wird der Zielwert im Jahr 2020 um 1.326 PJ und 2050 um 2.533 PJ überschritten (s. Abbildung 1-1).¹⁰ Unterschiedliche Szenarioanalysen bestätigen diese Ergebnisse (BMWi 2014).

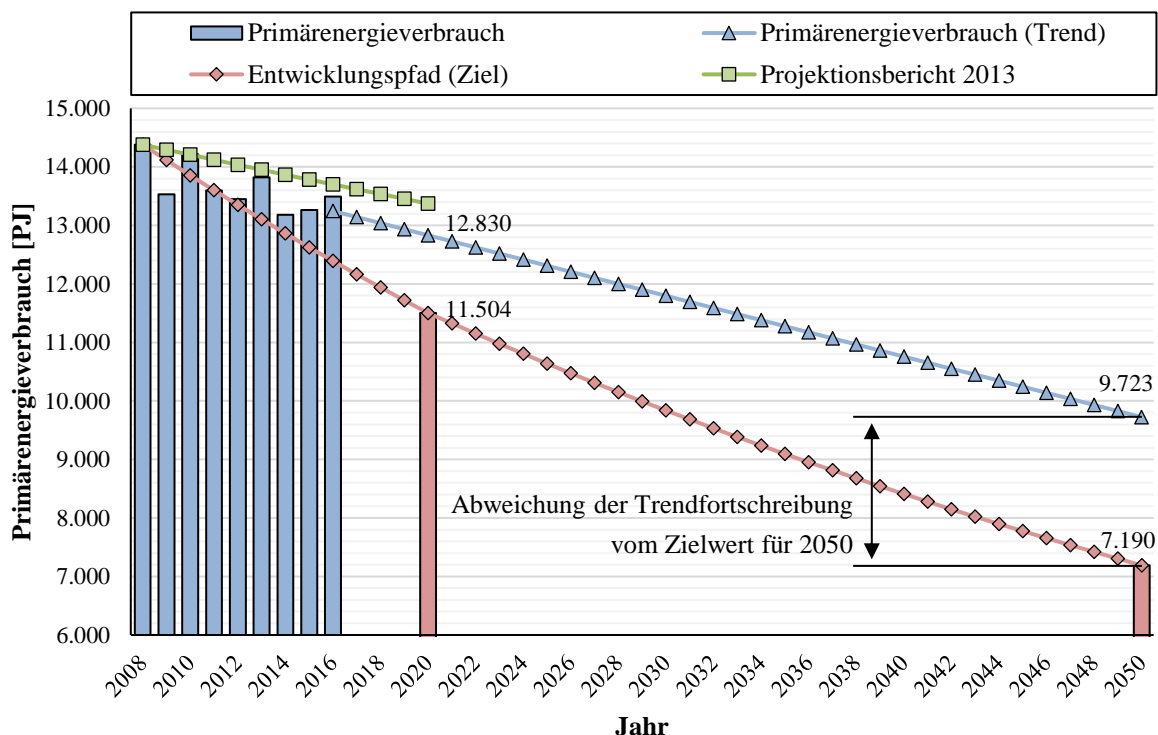


Abbildung 1-1: Vergleich der Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland seit 2008 inklusive linearer Trendfortschreibung (basierend auf der Entwicklung von 2008 bis 2016) bis 2020 und 2050 mit dem angestrebten Entwicklungspfad, Daten und Berechnungen basierend auf (AGEB 2018; BMWi 2014) sowie dem Projektionsbericht 2013 (BMU 2013 in BMWi 2014)

Ein vergleichbares Bild zeichnet sich bei der Analyse der Entwicklung der Endenergieproduktivität in Deutschland ab (s. Abbildung 1-2). Das Bruttoinlandsprodukt ist im Zeitraum von 2008 bis 2016 um durchschnittlich 1,0 % pro Jahr gestiegen. Im Jahr 2016 entspricht dies einer Steigerung um 8,7 % gegenüber 2008. Im gleichen Zeitraum hat sich der Endenergieverbrauch¹¹ um 0,1 % reduziert. Dies führt zu einem durchschnittlichen jährlichen Anstieg der Endenergieproduktivität um 1,1 % bzw. zu einem Anstieg um 8,8 % im Zeitraum von 2008 bis

¹⁰ Die lineare Trendfortschreibung bis in das Jahr 2020 respektive 2050 auf Basis der Periode von 2008 bis 2016 (neun Jahre) stellt in diesem Zusammenhang keine Prognose zur zukünftigen Entwicklung dar. Sie zeigt lediglich auf, welche Werte in den Zieljahren 2020 und 2050 bei gleichbleibender Entwicklung erreicht würden.

¹¹ „Die Endenergie umfasst nur die gehandelten Energieträger, die der Erzeugung bzw. Umwandlung von Nutzenergie dienen und somit endgültig als Energieträger dem Markt entzogen werden. Langfristige Lagerbestände zählen somit nicht zur Endenergie“ (VDI 2014).

2016. Aufgrund der gegenläufigen Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts (+ 8,7 %) und des Endenergieverbrauchs (- 0,1 %) werden selbige als entkoppelt angesehen. Eine Reduktion des Endenergieverbrauchs ist somit bei gleichzeitigem Wirtschaftswachstum möglich. Dennoch deutet die lineare Trendfortschreibung der Endenergieproduktivität auf Basis der Entwicklung von 2008 bis 2016 darauf hin, dass auch der Zielwert für 2050 voraussichtlich verfehlt wird (s. Abbildung 1-2).¹² Um den Zielwert für 2050 zu erreichen, ist ein Anstieg der Endenergieproduktivität um 2,3 % pro Jahr im Zeitraum von 2017 bis 2050 notwendig. Dies entspricht etwa dem 2,2-Fachen des durchschnittlichen jährlichen Anstiegs der Endenergieproduktivität im Zeitraum von 2008 bis 2016.

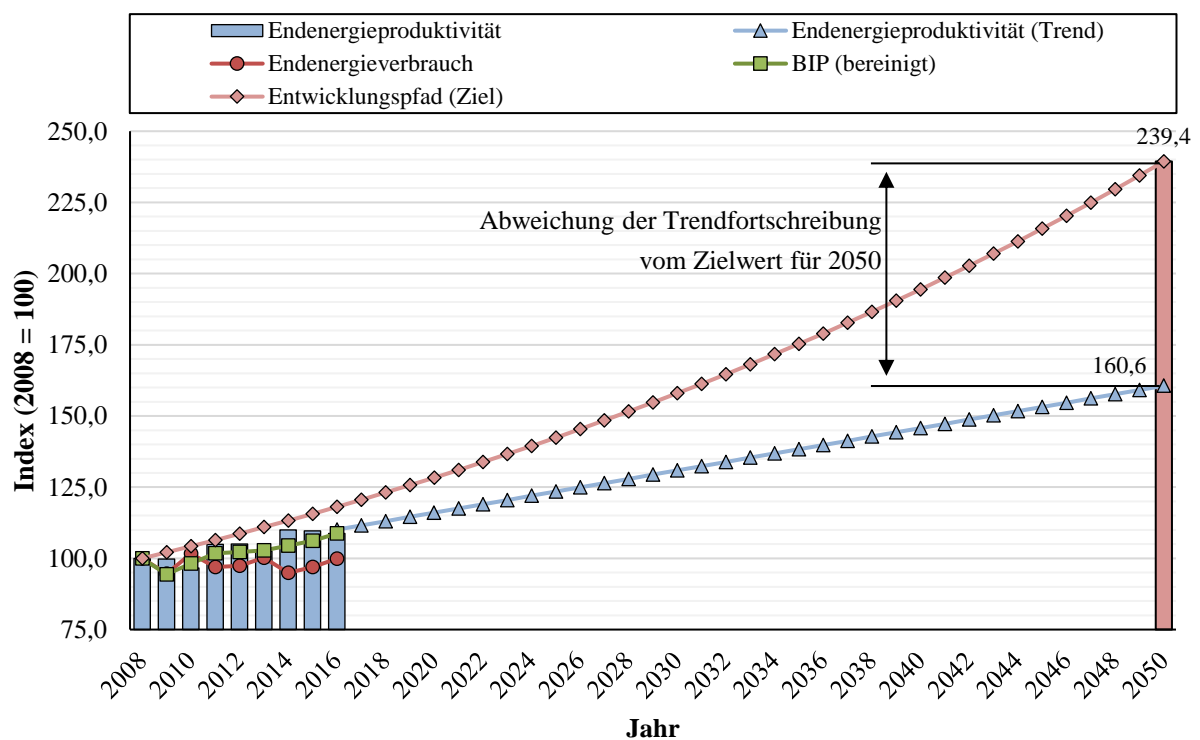


Abbildung 1-2: Vergleich der Entwicklung der Endenergieproduktivität, des Endenergieverbrauchs sowie des BIP (bereinigt) in Deutschland seit 2008 inklusive linearer Trendfortschreibung (basierend auf der Entwicklung von 2008 bis 2016) bis 2050 mit dem angestrebten Entwicklungspfad, Daten und Berechnungen basierend auf (AGEB 2018; BMWi 2018; Statistisches Bundesamt 2017d)

Dies verdeutlicht exemplarisch die Notwendigkeit zusätzlicher Anstrengungen zur Erreichung der gesetzten Energieeffizienzziele. Der NATIONALE AKTIONSPLAN ENERGIEEFFIZIENZ (NAPE) kommuniziert die Strategie der Bundesregierung zur Steigerung der Energieeffizienz in den Nachfragesektoren (BMWi 2014). Dabei wird eine Vielzahl von Maßnahmen verfolgt, bspw. die Ausweitung von Förderprogrammen und Anreizmechanismen sowie die Verbesserung des Informations- und Beratungsangebots, sodass Akteure „[...] die Auswirkungen von Maßnahmen zur Energieeffizienz besser verstehen, einschätzen und bewerten [...] können“ (BMWi

¹² An anderem Ort: Fußnote 10, S. 4.

2014). Ferner hat das BMWi (2016a) mit dem GRÜNBUCH ENERGIEEFFIZIENZ einen öffentlichen Konsultationsprozess für zukünftige Handlungsfelder gestartet. Eine der zentralen Thesen ist die im Rahmen des Konsultationsprozesses mehrheitlich bestätigte ‚Efficiency-First-Prämisse‘ (BMWi 2017, 2016a):

„Eine Energieeinheit, die eingespart werden kann, muss nicht erzeugt, gespeichert und transportiert werden [...]. Energieeffizienz spart Energie, trägt zur Verringerung von Treibhausgasemissionen bei und erleichtert insgesamt die Umstellung unserer Energieversorgung auf erneuerbare Energien“ (BMWi 2016a).

Mit einem Anteil von 28,7 % am deutschen Endenergieverbrauch im Jahr 2016 (AGEB 2017) ist die deutsche Industrie zum Erreichen der Energieeffizienzziele (s. Tabelle 1-1, S. 3) von besonderer Bedeutung. Zu den dominierenden Endenergieträgern in der deutschen Industrie zählen im Jahr 2016 fossile Gase (898 PJ bzw. 34,6 %), elektrischer Strom (816 PJ bzw. 31,4 %) und Kohlen (441 PJ bzw. 17,0 %). Damit ist die deutsche Industrie im Jahr 2016 für 43,8 % des gesamten deutschen Stromverbrauchs in Höhe von 1.863 PJ verantwortlich. Weitere 544 PJ bzw. 29,2 % entfallen auf Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), 462 PJ bzw. 24,8 % auf Haushalte und 42 PJ bzw. 2,3 % auf den Verkehr (AGEB 2017). Die energieintensiven Industriebranchen (u. a. Eisen-, Zement- und Papierindustrie) sind für ca. 65 % des industriellen Endenergieverbrauchs verantwortlich (Brunke 2017). Dezidierte Analysen zu bestehenden Energieeffizienzpotenzialen in der energieintensiven Industrie sind beispielsweise in Brunke (2017) und Fleiter et al. (2013) vorzufinden. Brunke (2017) bezifferte das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial der energieintensiven Industrie mit 134,2 PJ. Auch Bauernhansl (2014) bewertete im Rahmen einer Metaanalyse die Energieeffizienzpotenziale der deutschen Industrie. Etwa 73 % des industriellen Stromverbrauchs ist dabei den Querschnittstechnologien (u. a. Ventilatoren und Pumpen) zuzuordnen. IREES (2011) bezifferte den Anteil der Querschnittstechnologien am industriellen Stromverbrauch in Abhängigkeit der Branchen mit 37 bis 98 %. Pehnt et al. (2011) bewerteten das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial durch den Einsatz effizienterer Querschnittstechnologien mit 97,3 PJ bis 2020 und 129,5 PJ bis 2030, jeweils gegenüber der angenommenen Referenzentwicklung (Bauernhansl 2014).

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Ungeachtet der besonderen Relevanz der Energieeffizienz für das Erreichen der Energiewende-Ziele sowie der Existenz von Studien zu Energieeffizienzpotenzialen besteht eine Diskrepanz zwischen dem als wirtschaftlich identifizierten und dem realisierten Energieeffizienzpotenzial (Wohlfarth et al. 2018). Jaffe und Stavins (1994) bezeichneten die Lücke zwischen dem tatsächlichen und dem sich theoretisch bei der Umsetzung aller technisch und wirtschaftlich realisierbaren Energieeffizienzmaßnahmen einstellenden Energiebedarf als Energieeffizienzlücke (engl. *energy-efficiency gap*). In der Forschung wird darüber diskutiert, ob und – wenn ja – in

welchem Umfang eine Energieeffizienzlücke existiert (Shogren 2013). Kritiker der Energieeffizienzlücke sehen die Gründe für die Diskrepanz zwischen dem als wirtschaftlich identifizierten und dem realisierten Energieeffizienzpotenzial unter anderem in fehlerhaften Potenzialanalysen (Shogren 2013). Befürworter der Energieeffizienzlücke führen diese unter anderem auf bestehende Hemmnisse gegenüber Energieeffizienzmaßnahmen zurück (Brunke 2017; Gillingham und Palmer 2014; Allcott und Greenstone 2012; Jaffe und Stavins 1994; Hirst und Brown 1990). Derzeit fehlt es an empirischen Belegen, ob eine auf Hemmnissen basierende Energieeffizienzlücke existiert oder die Energieeffizienzlücke auf fehlerhafte Potenzialanalysen zurückzuführen ist (Shogren 2013). Es ist nicht auszuschließen, dass die Diskrepanz zwischen dem als wirtschaftlich identifizierten und dem realisierten Energieeffizienzpotenzial sowohl auf Hemmnisse gegenüber Energieeffizienzmaßnahmen als auch auf fehlerhafte Potenzialanalysen zurückzuführen ist.

In diesem Kontext wurden in den letzten Jahren sowohl Forschungsarbeiten zur Analyse bestehender Hemmnisse (u. a. Bauernhansl 2014) als auch zur Weiterentwicklung bestehender Methoden der Potenzialanalyse verfasst (u. a. Brunke 2017). Ein in der Literatur mehrfach diskutiertes Thema ist die unzureichende Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen bei der Analyse von Energieeffizienzpotenzialen (Brunke 2017; Fleiter et al. 2009). Die fehlende bzw. fehlerhafte Berücksichtigung kann sowohl zu Über- als auch zu Unterschätzungen der Potenziale führen und somit ggf. einen Teil der Abweichungen erklären. Auch Industrieverbände (u. a. GEA 2012; CSI 2009) kritisieren die fehlende bzw. fehlerhafte Bewertung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen. Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen bestehen beispielsweise bei der „Produktion in klimatisierten Räumen“ (Hesselbach 2012). Die Abwärme der Produktionsanlagen sorgt für einen Wärmeeintrag in die Gebäudeinfrastruktur. Dies führt im Sommer zu einem erhöhten Klimatisierungsbedarf, während im Winter der Raumwärmebedarf durch den Wärmeeintrag der Produktionsanlagen reduziert wird (Hesselbach 2012). In bestehenden Forschungsarbeiten werden Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen durch Approximationsalgorithmen abgeschätzt oder gänzlich vernachlässigt (Brunke 2017; Herrmann et al. 2011; Fleiter et al. 2009). Forschungsbedarf besteht demnach bei der Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen innerhalb einer Bilanzgrenze auf Basis kausaler Zusammenhänge. Brunke (2017) sieht darüber hinaus Bedarf zur Entwicklung von Algorithmen zur Bestimmung „[...] einer gesamtkostenminimalen Umsetzungsreihenfolge von sich gegenseitig beeinflussenden Energieeinsparmaßnahmen [...]“ und stellt die Hypothese auf, dass durch die bestehenden Approximationsalgorithmen insbesondere auf Einzelmaßnahmenebene signifikante Abweichungen auftreten würden.

Detaillierte Informationen zu Energieeffizienzpotenzialen sind nicht nur für energiewirtschaftliche Entscheidungsträger, sondern auch mit Blick auf eine optimale Ressourcenalloka-

tion für die Ausgestaltung energiepolitischer Ziele sowie von Förderprogrammen und Anreizmechanismen relevant (Brunke 2017). Insbesondere industrielle Entscheidungsträger sind auf detaillierte Informationen zu den Kosten und Energieeinsparpotenzialen von Energieeffizienzmaßnahmen sowie deren Wechselwirkungen mit dem Produktionssystem angewiesen (Trianni et al. 2014). Fehlerhafte Potenzialanalysen können zu Fehleinschätzungen bei der Investition in Energieeffizienzmaßnahmen führen und möglicherweise die Implementierung weiterer Maßnahmen verhindern.¹³

Vor diesem Hintergrund soll in dieser Arbeit folgende Leitfrage beantwortet werden:

Welche Rolle spielt die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen bei der Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen im industriellen Kontext?

In diesem Zusammenhang soll der Einfluss von Wechselwirkungen bei der technischen und ökonomischen Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen für Querschnittstechnologien¹⁴ analysiert werden. Zur Beantwortung der Leitfrage werden folgende Ziele für diese Arbeit formuliert:

- Ziel I Bestehende Limitierungen bei der Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen sollen identifiziert werden. Darauf aufbauend soll ein Verfahren zur adäquaten Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen (im Folgenden Verfahren zur integrierten Bewertung genannt) erarbeitet werden.
- Ziel II Für die unter Ziel I diskutierten Methoden sowie für das entwickelte Verfahren zur integrierten Bewertung soll mittels quantitativer Analysen am Beispiel von Querschnittstechnologien die Eignung im Hinblick auf die Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen untersucht werden.
- Ziel III Das entwickelte Verfahren zur integrierten Bewertung soll im Rahmen einer Potenzialanalyse für Querschnittstechnologien am Fallbeispiel der kunststoffverarbeitenden Industrie¹⁵ in Deutschland angewandt werden.

¹³ Bestehende Forschungsarbeiten bestätigen den möglichen Einfluss von negativer Mund-zu-Mund-Propaganda (engl. *negative word of mouth*, NWOM) auf das Konsumentenverhalten (u. a. Haywood 1989; Engel et al. 1969; Arndt 1967). Ebenso gingen Laczniaik et al. (2001) von einem potenziell signifikanten Einfluss von NWOM auf das Konsumentenverhalten aus, obgleich es noch an empirischen Untersuchungen zur Validierung dieser Zusammenhänge fehlte.

¹⁴ Der Anteil von Querschnittstechnologien am industriellen Stromverbrauch beträgt ca. 79 % (Berechnung basierend auf AGEB 2017). Damit nehmen Querschnittstechnologien mit Blick auf die im Rahmen der Energiewende formulierten Energieeffizienzziele eine zentrale Rolle ein.

¹⁵ Als Fallbeispiel für die Potenzialanalyse kommen insbesondere die nichtenergieintensiven Industriebranchen infrage, da deren Endenergieverbrauch in der Regel durch Querschnittstechnologien dominiert wird. Dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) liegen mehrere Energieaudits aus der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland vor. Damit ist die Datengrundlage für die kunststoffverarbeitende Industrie deutlich besser als für andere nichtenergieintensiven Industriebranchen.

1.3 Struktur der Arbeit

Aufbauend auf der in Abschnitt 1.2 dargelegten Problemstellung sowie den daraus abgeleiteten Zielsetzungen wird die Struktur der Arbeit beschrieben. Diese ist in Abbildung 1-3 dargestellt. Die Arbeit gliedert sich dabei in die vier Themenbereiche: Grundlagen, methodische Weiterentwicklung, Energieeffizienzpotenziale für Querschnittstechnologien in der Kunststoffverarbeitung und Schlussfolgerungen.

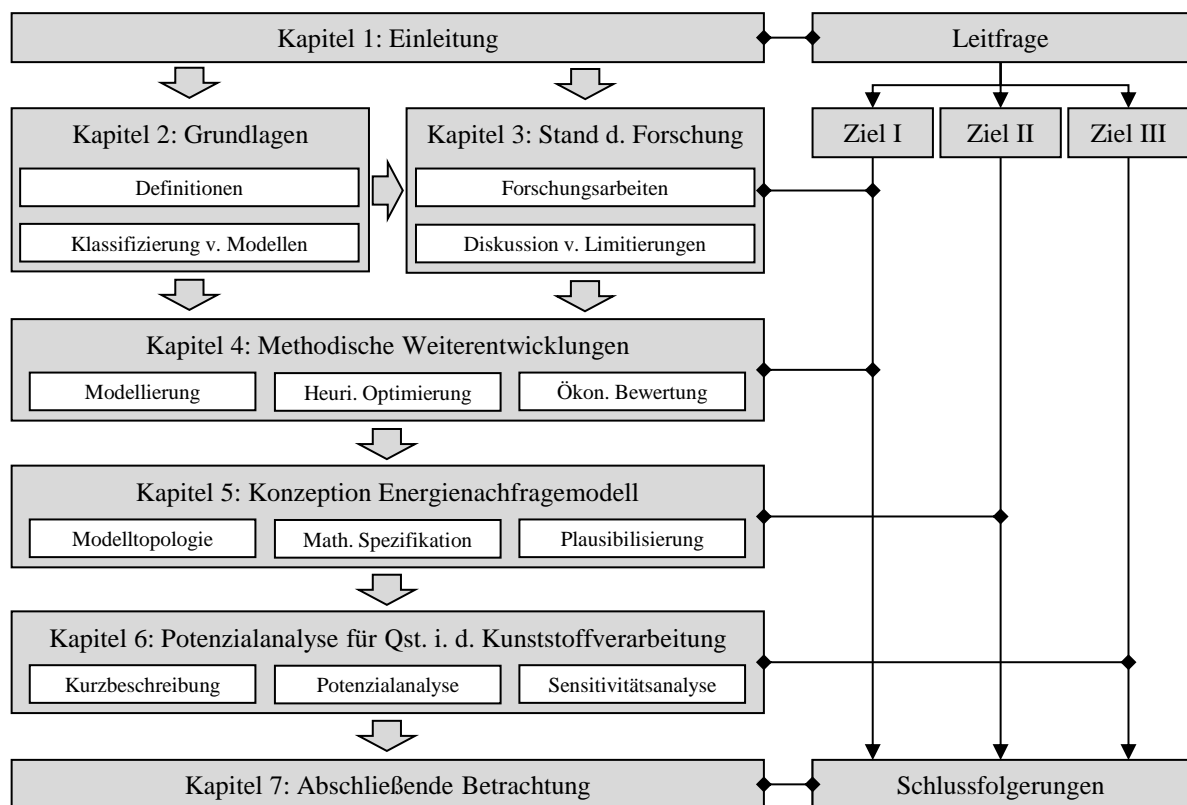


Abbildung 1-3: Struktur der Arbeit

Grundlagen

Zunächst wird in Kapitel 2 ein einheitliches Begriffsverständnis der für diese Arbeit relevanten Terminologien geschaffen. Ebenso werden für diese Arbeit relevante Grundlagen zur Klassifizierung mathematischer Modelle im Sinne der Systemforschung vorgestellt.

Methodische Weiterentwicklung

Im Hinblick auf das formulierte **Ziel I** dieser Arbeit wird darauf aufbauend in Kapitel 3 der Stand der Forschung zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen diskutiert. Dies umfasst eine Beschreibung bestehender Konzepte zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen, eine Einordnung der für diese Arbeit relevanten Forschungsarbeiten sowie eine konzeptionelle

Diskussion bestehender Limitierungen bei der Bewertung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen. Anschließend wird in Kapitel 4 das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur integrierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen vorgestellt. Dies umfasst eine Methode zur modellbasierten Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen sowie die Beschreibung eines heuristischen Optimierungsansatzes zur Identifikation einer (nahezu) kostenoptimalen Maßnahmenpermutation.

In Kapitel 5 wird, basierend auf den Ausführungen in Kapitel 4, ein Energienachfragemodell zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen für Querschnittstechnologien konzipiert. Die Modellbeschreibung umfasst eine Darstellung der Modelltopologie, der mathematischen Spezifikationen sowie der Modellparametrierung. Im Anschluss folgt eine Plausibilisierung des Energienachfragemodells. Im Hinblick auf das formulierte **Ziel II** wird am Beispiel von Querschnittstechnologien die Eignung im Hinblick auf die Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen analysiert. Dies erfolgt sowohl für die in Kapitel 3 diskutierten Methoden als auch für das in Kapitel 4 vorgestellte Verfahren zur integrierten Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen.

Effizienzpotenziale für Querschnittstechnologien in der Kunststoffverarbeitung

Unter Verwendung des in Kapitel 5 vorgestellten Energienachfragemodells erfolgt in Kapitel 6 mit Blick auf **Ziel III** dieser Arbeit eine Analyse der bestehenden Energieeffizienzpotenziale für Querschnittstechnologien am Fallbeispiel der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland. Die Analyse der Energieeffizienzpotenziale erfolgt unter Verwendung der Szenario-Technik; die Robustheit der Ergebnisse gegenüber Änderungen ausgewählter Rahmenannahmen wird im Zuge einer Sensitivitätsanalyse bewertet. Kapitel 6 beginnt einleitend mit einer Beschreibung der für diese Arbeit relevanten Grundlagen zur Kunststoffverarbeitung. Danach werden relevante Daten und Rahmenannahmen für die Szenario- und Sensitivitätsanalyse dokumentiert. Anschließend erfolgt die Identifikation bestehender Energieeffizienzpotenziale von Querschnittstechnologien zunächst auf Ebene charakteristischer Produkte und anschließend für die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland. Abschließend werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse vorgestellt und diskutiert.

Abschließende Betrachtung

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst, die **Schlussfolgerungen** mit Blick auf die definierte Leitfrage dargelegt und weiterer Forschungsbedarf identifiziert. Die Arbeit schließt mit einem (persönlichen) Schlusswort zu den wesentlichen Erkenntnissen der durchgeführten Analysen.

2 Definitionen und Grundlagen

Kapitel 2 dient der Schaffung eines einheitlichen Begriffsverständnisses sowie eines grundlegenden Verständnisses zur Klassifizierung der in der Systemforschung eingesetzten Energiemodelle. Dazu werden in Abschnitt 2.1 die für das weitere Verständnis relevanten Begrifflichkeiten definiert. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 ein Bewertungsrahmen zur Klassifizierung mathematischer Energiemodelle vorgestellt.

2.1 Definitionen

Nachfolgend werden zunächst die für diese Arbeit relevanten energiewirtschaftlichen Termini dargelegt (s. Abschnitt 2.1.1). Anschließend wird der Begriff der Querschnittstechnologien definiert und eine Abgrenzung zu den Prozesstechnologien vorgenommen (s. Abschnitt 2.1.2).

2.1.1 Energiewirtschaftliche Termini

Im Kontext der Debatte um Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz werden die Begriffe Energieeffizienz, rationelle Energieanwendung und Energieeinsparung ebenso wie die Begriffe Energieeffizienz- und Energieeinsparpotenziale teils synonym verwendet. Für ein einheitliches Begriffsverständnis werden die in dieser Arbeit verwendeten Definitionen nachfolgend beschrieben. Diese folgen den Ausführungen von Miller et al. (2016).

Energieeffizienz und rationelle Energieanwendung

Der Begriff Effizienz beschreibt das Verhältnis von Nutzen und Aufwand. Davon abzugrenzen ist der Begriff der Effektivität. Dieser beschreibt, ob ein angestrebter Nutzen erreicht wird (Brunke 2017; Miller et al. 2016; Kuder 2014).

$$\text{Effizienz} := \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad 2-1$$

Im energiewirtschaftlichen Kontext stellt der Nutzen die Erbringung einer Energiedienstleistung dar (Miller et al. 2016). „Energiedienstleistungen sind die aus dem Einsatz von Nutzenergie und anderen Produktionsfaktoren befriedigten Bedürfnisse bzw. erzeugten Güter, wie Beleuchten von Flächen und Räumen, Bewegen und Transportieren, [...], Umformen u. v. a. m.“ (VDI 2014). Der Aufwand umfasst die Summe der verwendeten Ressourcen – im Wesentlichen der Ressource Energie, wobei auch weitere Ressourcen berücksichtigt werden – zur Erbringung einer Energiedienstleistung. Abhängig vom Betrachtungshorizont kann der Energieein-

satz auf unterschiedlichen Umwandlungsstufen (z. B. Primär- oder Endenergie) bilanziert werden (Miller et al. 2016). Die Energieeffizienz entspricht dem Verhältnis des Nutzens bzw. des Ertrags in Form einer Energiedienstleistung zum End-/Primärenergieeinsatz (DIN 16212). Eine Steigerung der Energieeffizienz ist mit einer Reduktion des Energieeinsatzes bei normalem Nutzen verbunden. Werden dadurch die Gesamtkosten reduziert, so entspricht dies einem durch eine gesteigerte Energieeffizienz induzierten wirtschaftlichen Energieeinsparpotenzial (Miller et al. 2016). Von dem Begriff der Energieeffizienz abzugrenzen ist der Begriff der rationellen Energieanwendung. Ziel der rationellen Energieanwendung ist die Minimierung der Summe der Gesamtkosten aller bilanzierten Ressourcen (z. B. Energie, Material, Arbeitskraft). Die Bilanzierung erfolgt monetär. Demgemäß ist eine rationelle Energieanwendung per definitionem nicht notwendigerweise mit einer Energieeinsparung verbunden (Miller et al. 2016).

Im Gegensatz zu Miller et al. (2016) verwenden Brunke (2017) und Kuder (2014) die Begriffe Energieeffizienz und rationelle Energieanwendung synonym. In diesem Verständnis zielt eine Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz ebenso wie eine rationelle Energieanwendung auf einen „[...] optimalen Faktoreinsatz der genutzten volkswirtschaftlichen Ressourcen [...] (d. h. Minimierung des Ressourcenverbrauchs)“ (Brunke 2017) ab. Als Konsequenz ist eine effiziente Energienutzung (bzw. eine rationelle Energieanwendung) nicht zwangsläufig mit einer Energieeinsparung verbunden. Auf Basis einer Literaturlauswertung zeigten Miller et al. (2016), dass dieses synonyme Verständnis der Begriffe Energieeffizienz und rationelle Energieanwendung unter anderem den Ausführungen in AGEB (2014), Kosmol et al. (2012), Rat der Europäischen Union (2012), Pehnt et al. (2011), Europäische Kommission (2011), Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (2010), Europäisches Parlament und Rat (2006) und Grawe et al. (1991) sowie der Definition in DIN 16212 widerspricht.

Daher wird in dieser Arbeit der differenzierten Definition der rationellen Energieanwendung und der Energieeffizienz nach Miller et al. (2016) gefolgt. Eine gesteigerte Energieeffizienz kann somit bei normalem Nutzen nicht zu einem höheren Energieverbrauch führen (Miller et al. 2016). Ferner ist die Differenzierung der o. g. Begrifflichkeiten mit Blick auf die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung sinnvoll. Eines der Energieeffizienzziele ist beispielsweise der jährliche Anstieg der Endenergieproduktivität um 2,1 % im Zeitraum von 2008 bis 2050 (BMWi 2018, s. Abschnitt 1.1). Ein Anstieg der Endenergieproduktivität ist *ceteris paribus*¹⁶ nur durch eine Reduktion des Endenergieverbrauchs möglich. Im Begriffsverständnis von Brunke (2017) und Kuder (2014) würde eine effiziente Energienutzung (bzw. eine rationelle Energieanwendung) *ceteris paribus* nicht zwangsläufig zu einem Anstieg der Endenergieproduktivität führen, da definitorisch ein Anstieg der Energieeffizienz bei einem gleichzeitigen Anstieg des Energieverbrauchs möglich wäre.

¹⁶ *Ceteris paribus*: Unter (sonst) gleichen Umständen, unter (sonst) gleichen Voraussetzungen.

Energieeinsparungen und Energieeffizienzmaßnahmen

Bei einem normalisierten Nutzen ist eine gesteigerte Energieeffizienz somit per definitionem mit einer Reduktion des Energieeinsatzes und folglich mit einer Energieeinsparung verbunden. Andersherum resultiert eine Energieeinsparung nicht zwangsläufig aus einer gesteigerten Energieeffizienz. Diese kann auch durch eine Reduktion der bereitgestellten Energiedienstleistung generiert werden. Eine Steigerung der Energieeffizienz wird durch Umsetzen einer Energieeffizienzmaßnahme¹⁷ erreicht (Miller et al. 2016). Dabei werden zwei Typen von Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz unterschieden (DIN 16212):

- Endnutzer-Aktivitäten und
- Unterstützungsmaßnahmen.

Endnutzer-Aktivitäten sind durch den Endnutzer umgesetzte Energieeffizienzmaßnahmen (bspw. effizientere Elektromotoren), die unmittelbar zu einer Verbesserung der Energieeffizienz und folglich einer Energieeinsparung führen. Die Energieeinsparung kann somit das Resultat einer „physikalische[n], organisatorische[n] oder verhaltensbezogene[n] Aktivität sein“ (DIN 16212). Unterstützungsmaßnahmen sind nicht direkt mit einer Energieeinsparung und somit einer Energieeffizienzsteigerung verbunden (bspw. Mitarbeiterschulungen). Sie dienen als Katalysator zur Umsetzung von Endnutzer-Aktivitäten, die zur Steigerung der Energieeffizienz führen (DIN 16212).

Technische Wechselwirkungen

Werden zwei oder mehrere Energieeffizienzmaßnahmen mit direktem physikalischen Bezug umgesetzt, kommt es zu technischen Wechselwirkungen. Das Energieeinsparpotenzial der Energieeffizienzmaßnahmen ist dann nicht kumulativ. Wird beispielsweise eine Gebäudehülle gedämmt und gleichzeitig der Heizungskessel aus Effizienzgründen ausgetauscht, entspricht das gesamte Energieeinsparpotenzial beider Energieeffizienzmaßnahmen¹⁸ nicht der Summe der Einzelbewertung (Stoft 1995). Nach DIN 16212 sind technische Wechselwirkungen „[...] das Ergebnis eines Bezugs zu anderen Elementareinheiten für Maßnahmen oder aber den umgebenden physikalischen System[en] [...]“. Technische Wechselwirkungen können sowohl ne-

¹⁷ Die Begriffe ‚Maßnahme/n zur Steigerung der Energieeffizienz‘ und ‚Energieeffizienzmaßnahme/n‘ werden im Sinne dieser Arbeit synonym verwendet.

¹⁸ In Abhängigkeit der gewählten Bilanzgrenze kann bei der Gebäudedämmung auch von einer Energieeinsparmaßnahme gesprochen werden, da diese effektiv zu einer Endenergieeinsparung führt, der eigentliche Heizungsprozess im engeren Sinne aber nicht effizienter wird. Da im Sinne dieser Arbeit die Definition von Energieeffizienz aber auf Basis der Bewertungsebenen Energiedienstleistung (Nutzen) und Endenergie (Aufwand) erfolgt, stellt eine Gebäudedämmung – vorausgesetzt, sie führt bei normalisiertem Nutzen zu einer Endenergieeinsparung – eine ‚Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz‘ und somit eine ‚Energieeffizienzmaßnahme‘ dar (vgl. Definition: Energieeffizienz und rationelle Energieanwendung, S. 11).

gative Auswirkungen in Form eines reduzierten Energieeinsparpotenzials der Energieeffizienzmaßnahmen als auch positive Auswirkungen (synergetische Effekte) in Form eines erhöhten Energieeinsparpotenzials der Energieeffizienzmaßnahmen besitzen.

2.1.2 Querschnittstechnologien

Im Hinblick auf die Klassifizierung in der Industrie eingesetzter Technologien hat sich die Differenzierung zwischen Prozess- und Querschnittstechnologien etabliert. Der Begriff ‚Querschnittstechnologie‘ setzt sich aus den Wörtern ‚Querschnitt‘ und ‚Technologie‘ zusammen. Der Querschnitt ist ein „waagerechter Schnitt“ bzw. ein „repräsentativer, die wichtigsten Komponenten berücksichtigender Überblick“ (DWDS 2017a). Das Wort Technologie, ursprünglich von den griechischen Begriffen ‚téchnē‘ (τέχνη; Kunst, Kunstfertigkeit, Geschick, Handwerk, Gewerbe) und ‚lógos‘ (λόγος; Wort, Lehre, Wissenschaft) abgeleitet (DWDS 2017b), stellt im heutigen Begriffsverständnis die „Gesamtheit der zur Gewinnung und Bearbeitung von Stoffen nötigen Prozesse und Arbeitsgänge“ (Dudenredaktion o. J.) dar. Folglich beschreibt der Begriff Querschnittstechnologien im etymologischen Sinne die wichtigsten Prozesse und Arbeitsschritte zur Gewinnung und Bearbeitung von Stoffen. Die etymologische Wortbedeutung und das Begriffsverständnis im allgemeinen Sprachgebrauch sind weitestgehend komparabel. So definieren Behrendt und Erdmann (2010) Querschnittstechnologien als „[...] Technologien, deren Anwendungsgebiet sich nicht auf eine bestimmte Industrie beschränkt, sondern die über alle Branchen hinweg Verwendung finden“. Analog definieren Fleiter et al. (2013) Querschnittstechnologien als Technologien, „[...] die über die Grenzen verschiedener Industriebranchen und Verfahren eingesetzt werden (wie z. B. Druckluftsysteme, Beleuchtung, Elektromotoren, Ventilatoren und Pumpen) [...]“. Müller et al. (2009) spezifizieren diese Definition und beschreiben Querschnittstechnologien als „Verfahren und Methode, die branchenübergreifend eingesetzt sind; Sie realisier[en] Hilfsprozesse (z. B. Druckluftherzeugung) oder [sind] branchenunabhängiger Bestandteil (z. B. Antrieb) von branchenspezifischen Anwendungen (z. B. Druckmaschinen, Textilmaschinen)“. Ein divergierendes Begriffsverständnis tritt mit der konkreten Benennung von Querschnittstechnologien auf (s. Tabelle 2-1). Die Zusammenstellung der Literatur in Tabelle 2-1 erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Dennoch bietet sie einen Überblick über das im allgemeinen Sprachgebrauch vorliegende Begriffsverständnis. Die hier vorherrschende Heterogenität scheint wesentlich auf die qualitative sowie subjektive Beschaffenheit des Querschnittsbegriffs zurückzuführen zu sein. Faktoren wie die Zugehörigkeit zu einer Berufsgruppe sowie der akademische Hintergrund können das Begriffsverständnis eines Einzelnen beeinflussen. Die Schaffung einer im Sinne dieser Arbeit gültigen und einheitlichen Definition ist somit für das weitere Verständnis eminent. Diese folgt der Definition von Müller et al. (2009) sowie einer Konsolidierung des im allgemeinen Sprachgebrauch vorherrschenden Begriffsverständnisses (s. Tabelle 2-1). Demnach stellen neben der Beleuchtung die Elektromotoren sowie deren Anwendungen (Pumpen, Ventilatoren, Druckluftkompressoren)

die klassischen Querschnittstechnologien dar. Dabei können diese Querschnittstechnologien branchenunabhängiger Bestandteil einer branchenspezifischen Anwendung sein. Ferner sind die Bereitstellung von Prozess- und Klimakälte mit der Kompressionskältemaschine als markt-dominierende Technologie als Querschnittstechnologie definiert. Bei der Bereitstellung von Wärme wird im Sinne dieser Arbeit zwischen Heizungsanlagen sowie Anlagen zur Bereitstellung von Prozesswärme unterschieden. Erstgenannte sind aufgrund des eindeutig branchen-übergreifenden Fokus den Querschnittstechnologien zuzuordnen.

Tabelle 2-1: Ausgewählte Definitionen des Begriffs der Querschnittstechnologien

Quelle ¹⁾	Querschnittstechnologien
Kuder (2014)	Beleuchtung, Elektromotoren, Ventilatoren, Pumpen, Druckluft, Mahlprozesse, Walzen und Pressen, Informations- und Kommunikationstechnologie, Luftförderung, Kälteerzeugung, Raumwärme
Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2014)	Beleuchtung, Elektromotoren, Ventilatoren, Pumpen, Druckluft, Kältebereitstellung, Raumwärme, Abwärme, Verbrennungsanlagen (Temperaturen < 500 °C: Heizkessel, industrielle Dampferzeuger)
Bauernhansl (2014)	Beleuchtung, Elektromotoren, Ventilatoren, Pumpen, Druckluft, Kälteerzeugung
Blesl und Kessler (2013)	Beleuchtung, Elektromotoren, Ventilatoren, Pumpen, Druckluft, Rechenzentren, Galvanik, Abwärmenutzung, Lackierung, Kraft-Wärme-Kopplung, Prozesswärmebereitstellung
dena (2013)	Beleuchtung, Elektromotoren, Pumpen, Druckluft, Lüftung und Klima, Informations- und Kommunikationstechnologie, Wärme- und Kälteerzeugung
Hesselbach (2012)	Beleuchtung, Elektromotoren, Druckluft, Klima- und Lüftungstechnik, Prozesskälte, Prozesswärme, Kraft-Wärme-Kopplung
Müller et al. (2009)	Beleuchtung, Elektromotor, Prozesswärme, Raumwärme, Informations- und Kommunikationstechnologie

¹⁾ Zusammenstellung basierend auf (Jung 2016).

Die Bereitstellung von Prozesswärme wird aufgrund der großen Heterogenität (bspw. in Abhängigkeit des Temperaturniveaus) im Sinne dieser Arbeit den Prozesstechnologien zugeordnet. Ebenso werden die übrigen in Tabelle 2-1 aufgeführten Technologien (bspw. Galvanik und Lackieranlagen) den Prozesstechnologien zugeordnet.

2.2 Klassifizierung mathematischer Energiemodelle

Die **Systemforschung** (teilweise auch Systemwissenschaft genannt) beschreibt die Erarbeitung ganzheitlicher, zweckoptimaler Lösungen von Problemen soziotechnischer Systeme mit interdisziplinären Teams durch den Einsatz wissenschaftlicher Methoden der Modellierung (Ackoff und Sasieni 1968 in Hanssmann 1978). Die Systemforschung lässt sich nach folgenden Disziplinen klassifizieren:

- In der **Systemtheorie**, wesentlich geprägt durch die ‚allgemeine Systemtheorie‘ nach von Bertalanffy (1972), wird das Verhalten von Systemen durch mathematische Modelle beschrieben. Ziel ist die Schaffung eines besseren Verständnisses der Verhaltensstrukturen und Einflussparameter eines Systems (Voß 2010).
- Die **Systemanalyse** beschreibt „eine rein deskriptive Darstellung der Funktionsweise des Systems im Istzustand“ (Hanssmann 1978). Sie untersucht ein System auf seine Strukturmerkmale zur Ableitung von Abhängigkeiten und Wirkzusammenhängen unterschiedlicher politischer, sozialer, technologischer, demografischer oder sonstiger Faktoren (World Energy Conference 1986; Hanssmann 1978).
- „Die **Systemtechnik** stützt sich auf Methoden der Analyse, Planung, Realisierung und Optimierung komplexer Systeme, die im Rahmen der Systemforschung entwickelt wurden“ (Voß 2010; Hervorhebung nachträglich hinzugefügt).

Als wesentliche Instrumente werden in der Systemforschung mathematische Modelle eingesetzt. Imboden und Koch (2003) beschreiben ein Modell als „[...] ein Konzept, mit dem ein kompliziertes System vereinfacht dargestellt werden kann.“ Die Modellbildung erfolgt durch Abstraktion der Realität. Es werden ausschließlich die für das Verständnis der Systemstruktur relevanten Elemente und Beziehungen berücksichtigt (Voß 2010). Modelle lassen sich anhand ihrer Eigenschaften entsprechend unterschiedlichen Dimensionen klassifizieren. Der erste Bewertungsrahmen zur Klassifizierung von Energiemodellen¹⁹ ist auf das Werk CLASSIFICATION OF ENERGY MODELS von van Beeck (1999) zurückzuführen. Dieser findet noch heute in unterschiedlichen Forschungsarbeiten Anwendung (u. a. in Hall und Buckley 2016; Neshat et al. 2014; Dementjeva und Siirde 2009). Weitere Klassifizierungsschemata sind u. a. in den Arbeiten von Mousavi (2019), Fleischer (2019), Sun (2013), Özdemir (2012), Voß (2010), Remme (2006) und Hanssmann (1978) zu finden. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl und Bezeichnung der betrachteten Dimensionen. Beispielsweise wird in fünf der o. g. Arbeiten zwischen Simulations- und Optimierungsansätzen unterschieden. Van Beeck (1999) bezeichnet diese Dimension als ‚eingesetzte Methode‘ (engl. *underlying method*), Sun (2013) und Fleischer (2019) als ‚Lösungsverfahren‘, Remme (2006) als ‚mathematisches Format der Modellformulierung‘, Voß (2010) als ‚Art der Modellanwendung‘, Özdemir (2012) als ‚Modellierungsansätze‘ (engl. *model approaches*) und Mousavi (2019) als ‚Programmiertechnik‘ (engl. *programming technique*). Ferner findet eine Differenzierung zwischen linearen und nicht linearen Modellen statt. Van Beeck (1999) nennt diese Dimensionen den ‚mathematischen Ansatz‘

¹⁹ Der Begriff ‚Energiemodell‘ wird im Sinne dieser Arbeit als Sammelbegriff für alle Modelle zur Bewertung von energiewirtschaftlichen Fragestellungen verwendet. Zur Erstellung von Energiemodellen werden unterschiedliche Modellierungsumgebungen eingesetzt (z. B. TRNSYS, MATLAB, GAMS). Eine Sonderform dieser Programme stellen die Energiemodellgeneratoren dar (z. B. TIMES, Mesap PlaNet). Diese bieten die Möglichkeit zur individuellen und flexiblen Erzeugung von Energiemodellen auf Basis allgemeiner Gleichungssysteme, die durch spezifische Daten das zu modellierende System beschreiben.

(engl. *mathematical approach*), Voß (2010) die ‚Art der Modellrelation‘ und Mousavi (2019) ‚Methodik‘ (engl. *methodology*). Die obigen Beispiele verdeutlichen die Relevanz eines klar definierten und einheitlichen Bewertungsrahmens zur Klassifizierung von Energiemodellen. Daher wird für die Bewertung von Energiemodellen ein konsolidierter Klassifizierungsrahmen entwickelt (s. Abbildung 2-1). Ausgangspunkt für die Klassifizierung von Energiemodellen stellt die Identifikation der Zielsetzung dar. Diese bestimmt wesentlich die Gestalt eines Energiemodells. Das Energiemodell wird entlang der drei Dimensionen (1) Systemgrenze, (2) Struktur des Modells sowie (3) mathematische Modellbeschreibung unterschieden, wobei jede Dimension mehrere Kategorien besitzt. Die Zielsetzung, die drei Dimensionen sowie deren dazugehörigen Kategorien werden in den Abschnitten 2.2.1 bis 2.2.4 beschrieben.²⁰ Der im Rahmen dieser Arbeit entworfene Klassifizierungsrahmen erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit und Allgemeingültigkeit. Dennoch bietet er einen konsistent strukturierten Rahmen, der die einheitliche Klassifizierung von Energiemodellen im Sinne der in dieser Arbeit getroffenen Konventionen erlaubt.

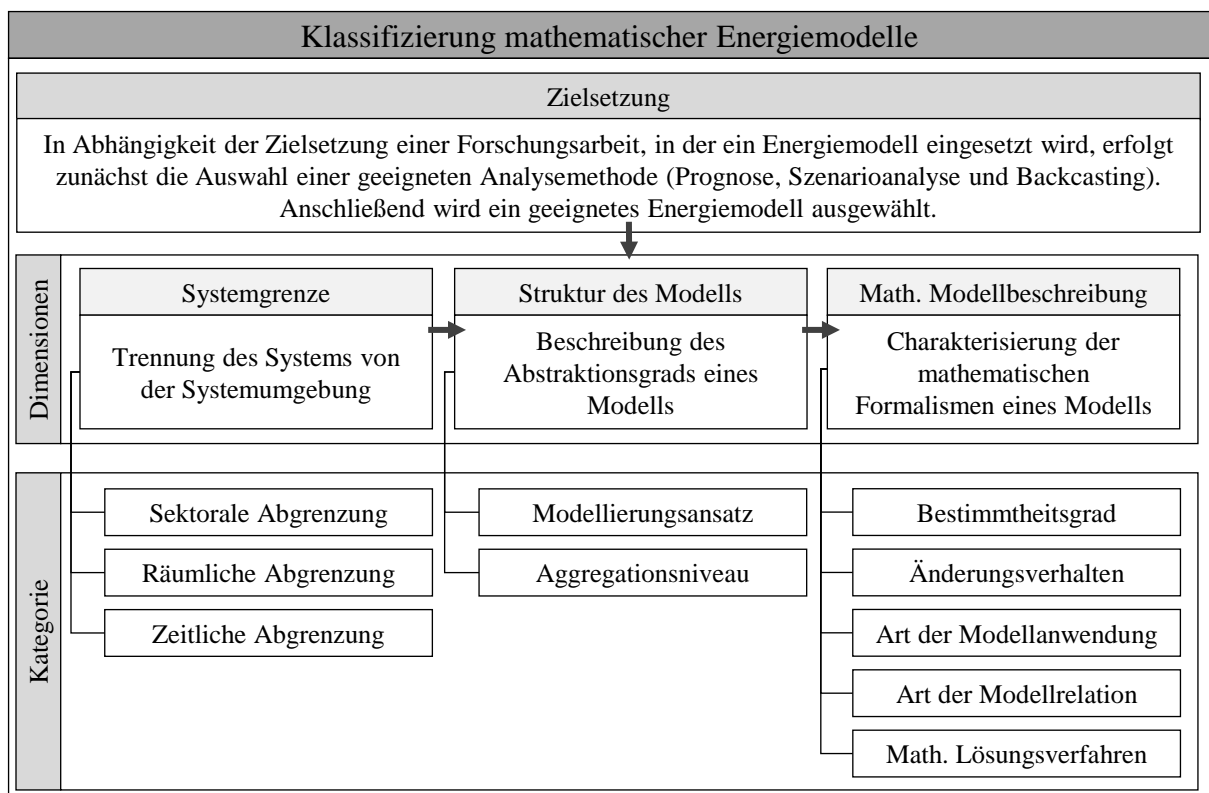


Abbildung 2-1: Bewertungsrahmen zur Klassifizierung mathematischer Energiemodelle

²⁰ Die Ausführungen in den Abschnitten 2.2.1 bis 2.2.4 bieten lediglich einen Überblick über die unterschiedlichen Dimensionen und Kategorien. Für eine umfassende Beschreibung wird auf entsprechende Fachliteratur verwiesen.

2.2.1 Zielsetzung

Energiemodelle fungieren als Katalysator zur Anregung von Diskussionen sowie als Werkzeug zur Lösungsfindung von komplexen Frage- und Problemstellungen im energiewirtschaftlichen Kontext (Jebaraj und Iniyar 2006). Die Frage- und Problemstellungen variieren in Abhängigkeit der adressierten Zielgruppen (bspw. Forschungseinrichtungen, öffentliche Einrichtungen/Ministerien, Verbände oder Verbrauchergruppen). In Abhängigkeit der Frage- und Problemstellungen werden unterschiedliche Modelle eingesetzt. „Ein Energiemodell, das Antwort auf alle Fragen bietet, gibt es ebenso wenig wie den ‚besten‘ methodischen Ansatz“ (Voß 1982). Typische Fragestellungen sind u. a. die Identifikation und Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen, die Evaluierung von Förderinstrumenten, die Bewertung neuer innovativer Technologien sowie die Analyse der zukünftigen Energienachfrage. Zur Beantwortung der Frage- und Problemstellungen werden unterschiedliche Analysemethoden eingesetzt. Hourcade et al. (1996) differenzieren zwischen Prognosen, Szenarioanalysen und dem Backcasting. **Prognosen** haben typischerweise einen kurzen Zeithorizont und versuchen auf Basis historischer Werte Aussagen über die Zukunft zu treffen. Die zentralen Randbedingungen bleiben in der Regel konstant (Mietzner 2009). In der **Szenarioanalyse** werden unterschiedliche zukünftige Entwicklungspfade in Szenarien zusammengefasst und mit einem Referenzszenario verglichen. Mögliche Unterschiede der Entwicklungspfade sind bspw. Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung oder Technologiediffusion (Hourcade et al. 1996). Im Gegensatz zur Prognose wird die Szenarioanalyse vermehrt bei einem mittel- bis langfristigen Zeithorizont eingesetzt (Mietzner 2009). Beim **Backcasting** werden Handlungsoptionen zur Erreichung eines avisierten Ziels in der Zukunft untersucht (van Beeck 1999). Im Gegensatz zur Prognose geht es nicht um die möglichst realitätsnahe Vorhersage der Zukunft, sondern um die Identifikation möglicher Implikationen durch die Definition normativer Ziele (Robinson 1982). Dreborg (1996) beschreibt Backcasting als eine Form der Szenarioanalyse, wobei die Durchführung einer Szenarioanalyse nicht die Methode des Backcastings impliziert. In Abhängigkeit der Zielsetzung werden unterschiedliche Modelle mit unterschiedlichen methodischen Ansätzen eingesetzt (Voß 1982).

2.2.2 Systemgrenze

Bei der Definition von Energiebilanzen ist eine eindeutige stoffliche, räumliche und zeitliche Abgrenzung der Bilanzkreise vorzunehmen (VDI 2014). Dabei ist die Wahl der Bilanzkreise von der Fragestellung bzw. Zielsetzung einer Untersuchung abhängig. Obgleich sich die Ausführung in VDI (2014) auf die Bilanzierung energietechnischer Anlagen bezieht, lässt sich dies auch auf die Systemgrenzen von Energiemodellen übertragen.

Sektorale Abgrenzung

Ihrem Abbildungsumfang entsprechend wird zwischen volkswirtschaftlichen Modellen sowie Energiesystem-, Energieversorgungs- und Energienachfragemodellen unterschieden. Ein **volkswirtschaftliches Modell**²¹ „[...] analysier[t] aus makroökonomischer Sicht Wechselwirkungen der Energiebranche mit der gesamten Volkswirtschaft [...]“ (Sun 2013). Dazu zählt mitunter die Bewertung von Bevölkerungs-, Arbeitsmarkt- und BIP-Effekten sowie die Bewertung der Auswirkungen der Klimaschutzpolitik. So untersucht Beestermöller (2017) den Einfluss unterschiedlicher Klimaschutzmaßnahmen auf die volkswirtschaftlichen Kosten im europäischen Kontext mit dem volkswirtschaftlichen NEWAGE-Modell (National European Worldwide Applied General Equilibrium). In **Energiesystemmodellen** werden sowohl die Umwandlungs- als auch die Nachfragesektoren eines Energiesystems betrachtet. Im energiewirtschaftlichen Kontext umfassen die Umwandlungssektoren im Wesentlichen die Bereitstellung von Endenergie (z. B. Strom, Erdgas, Fernwärme). Auf der Nachfrageseite wird zwischen den Verbrauchssektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Industrie, Privathaushalte, Verkehr und Landwirtschaft unterschieden. Die sektorale Abgrenzung ermöglicht eine differenzierte Analyse des Abbildungsumfangs eines Energiemodells. Modellspezifisch erfolgt die Abbildung der angebots- und nachfrageseitigen Sektoren auf einem unterschiedlichen Aggregationsniveau. Ein Vertreter der Energiesystemmodelle ist TIMES PanEU (Pan-Europäisches TIMES Energiesystemmodell) zur Analyse der Energieversorgung und -nachfrage in den EU-28-Staaten zuzüglich der Schweiz und Norwegen (Kuder 2014; Kober 2014). In **Energieversorgungsmodellen** werden ausschließlich die Umwandlungssektoren eines Energiesystems analysiert. Alternative Technologien bzw. Ressourcen werden unter Berücksichtigung ihrer Verfügbarkeit und ihres Einflusses auf die Systemkosten verglichen. Beispielsweise analysiert das Energieversorgungsmodell E2M2s (European Electricity Market Model) den deutschen Elektrizitätsmarkt. Die aus den Verbrauchssektoren abgeleitete Stromnachfrage wird exogen vorgegeben (Fleischer 2019). Komplementär zu den Energieversorgungsmodellen fokussieren **Energienachfragemodelle** die (End-)Energienachfrage in den Verbrauchssektoren. Die (End-)Energiebereitstellung wird nicht betrachtet. Die Energienachfrage wird durch direkte und indirekte Bestimmungsgrößen beeinflusst. Zu den direkten Bestimmungsgrößen zählen u. a. technische Faktoren (bspw. Zugewinne in der Energieeffizienz), ökonomische Faktoren (bspw. gemessen am BIP) sowie strukturelle Veränderungen in den Verbrauchssektoren. Indirekte Bestimmungsgrößen sind etwa Verbrauchergewohnheiten und -präferenzen (World Energy Conference 1986; van Beeck 1999). Ein Vertreter der Energienachfragemodelle ist

²¹ Im Sinne dieser Arbeit umfassen volkswirtschaftliche Modelle ausschließlich diejenigen, deren Schwerpunkt auf den Energiemärkten liegt.

MAED-2 (Model for Analysis of Energy Demand) zur Analyse der zukünftigen Endenergienachfrage im (inter-)nationalen und globalen Kontext auf Basis sozio-ökonomischer, technischer und demografischer Effekte (IAEA 2006).

Räumliche Abgrenzung

Entsprechend ihrer räumlichen Abgrenzung werden globale, internationale, nationale, lokale und standortspezifische Energiemodelle unterschieden (van Beeck 1999). Auf **globaler und internationaler Ebene** liegt der Schwerpunkt in der Regel auf der Bewertung makroökonomischer Zusammenhänge. Beispiele der globalen Energiemodelle sind das von der IEA verwendete Energiesystemmodell WEM (World Energy Model) zur mittel- bis langfristigen Analyse der globalen Energiemärkte (OECD und IEA 2016) sowie das Energiesystemmodell TIAM (TIMES Integrated Assessment Model) zur langfristigen Analyse der Energiemärkte und der Wirkung von CO₂-Vermeidungsmaßnahmen (u. a. in Kypreos und Lehtila 2015; Labriet et al. 2008). Energieversorgungs- und Energienachfragemodelle kommen vermehrt (aber nicht ausschließlich) bei der Analyse **(inter-)nationaler oder lokaler Systeme** zum Einsatz. Ein Vertreter hierfür ist beispielsweise das Energieversorgungsmodell JMM (Joint Market Model) zur Analyse der europäischen Strom- und Wärmemärkte (Meibom et al. 2006). Weitere Beispiele sind US-REGEN (US Regional Economy, Greenhouse Gas, and Energy Model) zur Kapazitäts- und Einsatzplanung in der Elektrizitätswirtschaft (Young et al. 2014) sowie nationale Anwendungen des TIMES-Modellgenerators unter anderem für die Regionen Deutschland (Götz et al. 2011), Schweiz (Kannan und Turton 2012) und Frankreich (Assoumou und Maizi 2011). Die räumliche Abgrenzung hat, mit Blick auf die damit verbundene Modellgröße, die Rechenzeit sowie die Verfügbarkeit konsistenter Daten, wesentlichen Einfluss auf die Struktur eines Energiemodells.

Zeitliche Abgrenzung

Gemäß der zeitlichen Abgrenzung eines Energiemodells wird zwischen **kurz-** (1–5 Jahre), **mittel-** (5–20 Jahre) **und langfristigen Untersuchungen** (> 20 Jahre) unterschieden (Grubb et al. 1993). Der Zeithorizont hat Einfluss auf die technischen, sozialen, ökonomischen und ökologischen Effekte (van Beeck 1999). Ferner beeinflusst die zeitliche Abgrenzung die Unsicherheiten bei der Parameterdefinition (z. B. die Energieträgerpreisentwicklung, mögliche Änderungen der regulatorischen Rahmenbedingungen, die Bevölkerungs- und BIP-Entwicklung) und somit die Robustheit der Ergebnisse. Daher wird bei einem mittel- bis langfristigen Zeithorizont vermehrt die Methode der Szenarioanalyse angewandt (Mietzner 2009).

2.2.3 Modellstruktur

In puncto Struktur eines Energiemodells wird zwischen dem gewählten Modellierungsansatz sowie dem Aggregationsniveau unterschieden. Beide Dimensionen werden wesentlich durch die Zielsetzung sowie die Systemgrenzen beeinflusst.

Modellierungsansatz

Modelle werden entsprechend ihres Modellierungsansatzes in Bottom-up- und Top-down-Ansätze untergliedert. Der Modellierungsansatz ist eng an die stoffliche und räumliche Abgrenzung geknüpft. Der **Bottom-up-Ansatz** wird auch als technisch bzw. ingenieurwissenschaftlich orientierter Ansatz bezeichnet (Grubb et al. 1993). Ein System wird dabei auf Basis (detailliert) abgebildeter Technologien oder Prozesse beschrieben (Remme 2006). Die nachfragebestimmenden Größen, bspw. die Entwicklung der Produktion eines Industrieunternehmens, induzieren den (End-)Energiebedarf. Ein wesentliches Differenzierungsmerkmal des Bottom-up-Ansatzes ist die Berücksichtigung des Technologiebestands. Hier wird zwischen Modellen mit aggregiertem (u. a. das Energienachfragemodell MAED-2) und explizitem (u. a. das Energiesystemmodell DN21+) Technologiebestand unterschieden. Erstere betrachten komplette Produktionsprozesse oder Technologiegruppen, bspw. die gesamte Zementindustrie oder die Gesamtheit aller Elektromotoren in der Industrie, als einen aggregierten Verbraucher. Letztere berücksichtigen explizite Daten zum Anlagenbestand (Fleiter et al. 2011). Im Gegensatz zum Bottom-up-Ansatz findet der **Top-down-Ansatz** vermehrt in volkswirtschaftlichen Modellen Anwendung (van Beeck 1999; Grubb et al. 1993). Ein System, bspw. die Energiewirtschaft, wird auf einem aggregierten Niveau betrachtet, wobei die in dem System befindlichen Prozesse auf Basis funktionaler Zusammenhänge beschrieben werden. Eine detaillierte Technologiebeschreibung ist üblicherweise nicht vorgesehen (Remme 2006).

Aggregationsniveau

Modelle werden anhand ihres Aggregationsniveaus in Black-, Grey- und Whitebox-Modelle untergliedert (Dyckhoff und Spengler 2010; Kerdoncuff 2008). Abbildung 2-2 zeigt schematisch die Unterschiede der drei genannten Aggregationsniveaus. In einem **Blackbox-Modell** liegt der Fokus auf den ein- und austretenden Faktoren ohne Berücksichtigung des inneren Systemverhaltens (Hanssmann 1978). Blackbox-Modelle werden auch als deskriptive Modelle bezeichnet. Anstelle von kausalen Zusammenhängen zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen werden diese mit empirischen Relationen beschrieben. Sie werden vorwiegend eingesetzt, wenn die realen Zusammenhänge nicht abgebildet werden können (Hanssmann 1978). Der Fokus von **Whitebox-Modellen** liegt auf der exakten Imitation der Wirklichkeit. Whitebox-Modelle werden auch als kausale Modelle bezeichnet, da „[...] die Modellrelationen einen ursäch-

lichen Zusammenhang [...]“ (Hanssmann 1978) wiedergeben. Das innere Verhalten eines Systems wird bspw. auf Basis physikalischer oder chemischer Gesetzmäßigkeiten beschrieben. Mit zunehmender Kausalität steigt die Ergebnisgüte eines Modells (Hanssmann 1978). Whitebox-Modelle werden insbesondere in der Produktentwicklung eingesetzt (Hirzel 2015).

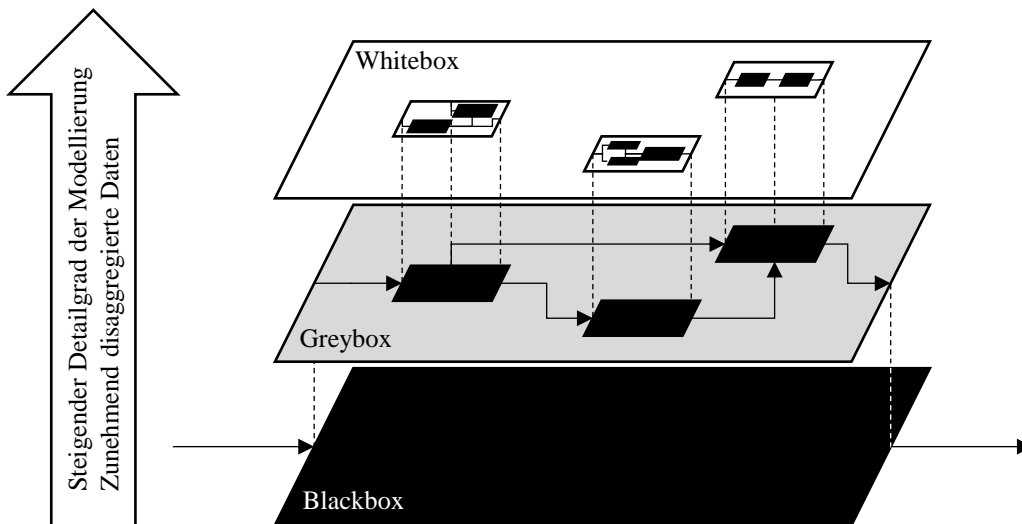


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung unterschiedlicher Aggregationsniveaus von Energiemodellen, in Anlehnung an (Hirzel 2015; Kerdoncuff 2008)

Die **Greybox-Modellierung** stellt eine hybride Form der Black- und Whitebox dar. Es werden ausschließlich die für eine Untersuchung relevanten Komponenten eines Systems modelliert. Die Betrachtungstiefe orientiert sich an den individuellen Bedürfnissen des Anwenders. Folglich können sowohl kausale als auch empirische Modellrelationen verwendet werden.

2.2.4 Mathematische Modellbeschreibung

Die mathematische Modellbeschreibung wird anhand der fünf Dimensionen Bestimmtheitsgrad, Änderungsverhalten, Art der Modellanwendung, Art der Modellrelation und mathematische Lösungsverfahren charakterisiert.

Bestimmtheitsgrad

Modelle werden entsprechend ihrem Bestimmtheitsgrad bzw. ihrer Vorhersagbarkeit in deterministische- und stochastische Modelle klassifiziert. Ein **deterministisches Modell** beruht ausschließlich auf bekannten Größen (deterministische Parameter) (Hanssmann 1978). Bei gleichen Parametern lassen sich reproduzierbare Ergebnisse erzielen. Beispielsweise verwendet das Energiesystemmodell TIMES PanEU ausschließlich deterministische Parameter. Ein **stochastisches Modell** verwendet neben deterministischen Parametern auch Zufallsgrößen (stochastische Parameter) (Hanssmann 1978). Infolgedessen sind exakte Ergebnisse eines Re-

chenlaufs in einem stochastischen Modell nicht reproduzierbar. Domschke et al. (2015) beschreiben die Anwendungsgebiete der deterministischen und stochastischen Modelle wie folgt: „Deterministische Modelle dienen der Entscheidungsfindung bei Sicherheit, stochastische Modelle der Entscheidungsfindung bei Risiko.“ Beispielsweise nutzt die von Sun (2013) verwendete Modellversion des Elektrizitätsmarktmodells E2M2s einen stochastischen Ansatz zur Berechnung „[...] der unsicheren elektrischen Einspeisung aus fluktuierenden erneuerbaren Energien [...]“ (Sun 2013).

Änderungsverhalten

Das Änderungsverhalten von Modellen kann sowohl statisch als auch dynamisch beschrieben werden. **Statische Modelle** bewerten ein System zu einem definierten Zeitpunkt. Hanssmann (1978) spricht in diesem Zusammenhang von einer Momentaufnahme eines Systems. **Dynamische Modelle** berücksichtigen zeitvariable Systemveränderungen durch die Betrachtung mehrerer aufeinanderfolgender Zeitpunkte (World Energy Conference 1986; Hanssmann 1978). Das Ergebnis zum Zeitpunkt $t + 1$ wird durch das Ergebnis zum Zeitpunkt t beeinflusst (World Energy Conference 1986).

Art der Modellanwendung

In der Literatur werden unterschiedliche Arten der Modellanwendung unterschieden. Die Arten der Modellanwendung lassen sich weitestgehend dem technologieorientierten Bottom-up-Ansatz und dem makroökonomischen Top-down-Ansatz zuordnen (van Beeck 1999).

Zu den Modellen mit technologieorientiertem Bottom-up-Ansatz zählen mehrheitlich die Energiesystem-, Energieversorgungs- und Energienachfragemodelle. Entsprechend der Art der Modellanwendung wird zwischen dem optimierenden Ansatz, dem simulierenden Ansatz sowie dem simulationsbasierten Optimierungsansatz unterschieden (van Beeck 1999). Beim **optimierenden Ansatz** wird unter Berücksichtigung definierter Nebenbedingungen in einem durch unterschiedliche Freiheitsgrade eingeschränkten Lösungsraum ein entsprechend der Zielfunktion optimales System bestimmt (Remme 2006). Optimierungsmodelle werden u. a. zur Bestimmung der optimalen Investitionsentscheidungen in Energieerzeugungskapazitäten (bspw. dem Ausbau erneuerbarer Energien) für ein bestehendes Energiesystem eingesetzt (van Beeck 1999). Beim **simulierenden Ansatz** wird ein System auf Basis logischer Zusammenhänge in mehr oder weniger vereinfachter Form beschrieben (World Energy Conference 1986). Es werden definierte Handlungsoptionen sowie deren Auswirkungen auf ein System bewertet. Dabei hat das System im Gegensatz zum optimierenden Ansatz keine Freiheitsgrade (Remme 2006). Der simulierende Ansatz erlaubt bei vertretbarem Aufwand einen höheren Detaillierungsgrad als der optimierende Ansatz (Brunke 2017). Er wird u. a. zur Szenarioanalyse eingesetzt (van Beeck 1999). Beim **simulationsbasierten Optimierungsansatz** handelt es sich

um einen Hybrid aus dem Simulations- und dem Optimierungsansatz. Klassische Simulationsmodelle werden mit Aspekten eines Optimierungsmodells verbunden. Anhand einer definierten Zielfunktion werden unterschiedliche Parameterkombinationen berechnet und die im Sinne der Zielfunktion optimale Kombination an Parametern ausgewählt (Deng 2007). Mit zunehmend verfügbarer Rechenleistung sowie der kontinuierlichen Weiterentwicklung heuristischer Optimierungsalgorithmen rücken simulationsbasierte Optimierungen insbesondere bei der Bewertung diskreter Probleme in den Vordergrund (Law und McComas 2000).

In Modellen mit makroökonomischem Top-down-Ansatz werden mehrheitlich Gleichgewichtsmodelle, Input-Output-Modelle und ökonometrische Modelle verwendet (Sun 2013; Nakata et al. 2011; van Beeck 1999). **Gleichgewichtsmodelle** werden zur mittel- bis langfristigen Bewertung einer Volkswirtschaft eingesetzt. Es wird zwischen allgemeinen und partiellen Gleichgewichtsmodellen unterschieden. Allgemeine Gleichgewichtsmodelle betrachten einen Gleichgewichtszustand in allen Sektoren einer Volkswirtschaft, während partielle Gleichgewichtsmodelle ausschließlich den Gleichgewichtszustand in ausgewählten Sektoren bewerten. Gleichgewichtsmodelle beruhen auf der neoklassischen Theorie²² eines perfekten Markts (van Beeck 1999). Ein Vertreter der allgemeinen Gleichgewichtsmodelle ist beispielsweise MERGE (A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies) zur Analyse der Wirkung von Klimaschutzmaßnahmen und -politik (Blanford et al. 2008; Manne et al. 1995). Im weiteren Sinne stellen Gleichgewichtsmodelle, mit den durch die Gewinnmaximierung getriebenen Akteuren, eine Form der Optimierung ohne globale Zielfunktion dar²³ (Böhringer und Wiegard 2018; Sun 2013). **Input-Output-Modelle** werden zur Bewertung gesamter Volkswirtschaften und der darin enthaltenen Wechselwirkungen zwischen den Sektoren eingesetzt (Leontief 1986). Die einzelnen Attribute einer Volkswirtschaft werden mittels Input-Output-Relationen dargestellt.²⁴ Sie dienen u. a. zur Ableitung von Wirkzusammenhängen in der Nachfrage interagierender Wirtschaftssektoren (World Energy Conference 1986). Der **ökonometrische Ansatz** verwendet statistische Methoden zur Beschreibung der Zukunft auf Basis historischer Daten (Neshat et al. 2014). Er stellt „eine Synthese von (mathematischer) Wirtschaftstheorie und statistischen Methoden“ (World Energy Conference 1986) dar. Mögliche Einsatzgebiete sind u. a. die kurz- bis mittelfristigen Prognosen unterschiedlicher Faktoren wie Arbeitskraft und Kapital (van Beeck 1999).

²² Die neoklassische Wirtschaftstheorie ist maßgeblich auf das Werk AN INQUIRY INTO THE NATURE AND CAUSES OF THE WEALTH OF NATIONS des schottischen Moralphilosophen und Nationalökonomen Adam Smith aus dem Jahre 1776 zurückzuführen.

²³ Der Gleichgewichtszustand stellt im Sinne des Pareto-Optimums den Punkt dar, an dem sich die Position von mindestens einem Individuum durch eine weitere Umverteilung von Gütern oder Ressourcen verschlechtert (Arrow und Debreu 1954).

²⁴ 1973 erhielt Wassily Leontief für die Entwicklung der Input-Output-Analyse den Alfred-Nobel-Gedächtnispreis für Wirtschaftswissenschaften.

Art der Modellrelation (Programmierung)

Eine weitere Kategorie der mathematischen Modellbeschreibung ist die Art der Modellrelation. Sie dient zur Definition der mathematischen Formulierung von Modellen. Es wird zwischen der linearen (ganzzahlig und gemischt ganzzahlig), der nicht linearen und der dynamischen Programmierung unterschieden. Die in Energiemodellen vermutlich am weitesten verbreitete Art der Modellrelation ist die **lineare Programmierung** (van Beeck 1999; Messner und Strubegger 1995). Hier weisen alle Modellgleichungen ausschließlich lineare Zusammenhänge auf. Die lineare Programmierung wird u. a. zur Formulierung von Optimierungsproblemen eingesetzt, da diese (mit geringem Rechenaufwand) nachweisbar optimal gelöst werden können (bspw. durch den Simplex-Algorithmus). Eine Sonderform der linearen Programmierung stellt die **(gemischt) ganzzahlige lineare Programmierung** dar. Bei der ganzzahligen linearen Programmierung müssen alle Entscheidungsvariablen einen ganzzahligen Wert annehmen. Bei der gemischt ganzzahligen linearen Programmierung müssen nur ausgewählte Entscheidungsvariablen die Ganzzahligkeitsbedingung erfüllen. Die (gemischt) ganzzahlige lineare Programmierung ermöglicht die Implementierung diskreter Entscheidungen (beispielsweise hinsichtlich der Dimensionierung in der Kraftwerksplanung) sowie binärer ‚Ja-Nein-Entscheidungen (0/1)‘ in ein lineares Optimierungsproblem (van Beeck 1999; Messner und Strubegger 1995). Eine Möglichkeit zur Implementierung nicht linearer Zusammenhänge in ein gemischt ganzzahliges lineares Energiemodell bietet die stückweise lineare Approximation (Fleischer 2019; Eriksson et al. 2013; Williams 2013). Die **nicht lineare Programmierung** erlaubt im Gegensatz zur linearen Programmierung auch die Verwendung nicht linearer Funktionen und Zusammenhänge. Aufgrund der höheren Komplexität hinsichtlich der mathematischen Lösungsverfahren ist die nicht lineare Programmierung weniger verbreitet als die lineare Programmierung. Es existiert kein universelles Verfahren zur Lösung aller nicht linearen Optimierungsprobleme (Domschke et al. 2015). Die **dynamische Programmierung** bietet die Möglichkeit zur Bewertung von Entscheidungsproblemen. Mit Bezug auf das Bellman'sche Optimalitätsprinzip wird die dynamische Programmierung zur Lösung von Optimierungsproblemen eingesetzt, bei denen die Summe der optimal gelösten Teilprobleme auch zum globalen Optimum des Gesamtproblems führt. Ein klassisches Beispiel, das mittels dynamischer Programmierung gelöst werden kann, ist das Knapsack-Problem²⁵ (Domschke et al. 2015).

²⁵ Beim Knapsack-Problem (auch Rucksackproblem genannt) handelt es sich um ein kombinatorisches Optimierungsproblem. Aus einer Menge an Objekten mit definierten Gewicht und Nutzen ist die Objektkombination zu identifizieren, die unter Berücksichtigung eines maximalen kumulierten Gewichts den maximalen Nutzen generiert (Domschke et al. 2015).

Mathematische Lösungsverfahren

In Abhängigkeit der Art der Modellanwendung sowie der Art der Modellrelation werden unterschiedliche mathematische Lösungsverfahren eingesetzt. Es lassen sich unter anderem numerische und heuristische Lösungsverfahren unterscheiden.²⁶ **Numerische Verfahren** werden u. a. zur Lösung von Optimierungsproblemen eingesetzt. Dazu zählt beispielsweise der Simplex-Algorithmus zum Lösen linearer Optimierungsprobleme. Es existieren numerische Verfahren zur Lösung von linearen Optimierungsproblemen die nachweislich zur optimalen Lösung führen, wobei hier die Rechenintensität eine mögliche Restriktion darstellen kann. **Heuristische Verfahren** finden dann Anwendung, wenn die existierenden numerischen Verfahren an ihre Grenzen gelangen. Dies ist beispielsweise bei ganzzahligen sowie kombinatorischen Optimierungsproblemen der Fall. Durch den Einsatz einer Heuristik wird der Lösungsaufwand (bspw. die Rechendauer) reduziert. Nachteilig sind die nicht gegebene Lösungs- sowie Optimalitätsgarantie (Grünig und Kühn 2013). Eine Sonderform der Heuristiken stellen die Meta-Heuristiken dar. Hier handelt es sich um nicht problemspezifische heuristische Verfahren (Sand 2013; Blum und Roli 2003). Dazu zählt beispielsweise der Ameisenalgorithmus (Blum und Roli 2003).

²⁶ Für detaillierte Informationen zu numerischen oder heuristischen Lösungsverfahren wird an dieser Stelle auf entsprechende Fachliteratur verwiesen (u. a. Domschke et al. 2015; Grünig und Kühn 2013; Eriksson et al. 2013).

3 Stand der Forschung

Die Analyse des Stands der Forschung zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen dient als Grundlage für die Diskussion bestehender Limitierungen bei der Bewertung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen sowie für die Entwicklung eines Verfahrens zur integrierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen. Dazu werden in Abschnitt 3.1 einleitend die für diese Arbeit relevanten Methoden zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen beschrieben. Anschließend erfolgt in Abschnitt 3.2 eine Einordnung bisheriger und für diese Arbeit relevanter Forschungsarbeiten. Abschließend werden in Abschnitt 3.3 konzeptionelle Limitierungen bei der Bewertung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen diskutiert (vgl. Ziel I, Abschnitt 1.2).

3.1 Methoden zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen

In der wissenschaftlichen Forschung haben sich Kostenpotenzialkurven als Werkzeug zur Visualisierung der Ergebnisse einer Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen etabliert. Sie stellen die Kombination einer technischen bzw. energetischen sowie einer ökonomischen Analyse dar. In Abschnitt 3.1.1 werden zunächst ausgewählte Methoden der ökonomischen Bewertung erläutert, anschließend erfolgt in Abschnitt 3.1.2 eine Beschreibung der Methoden zur technischen bzw. energetischen Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 3.1.3 das Konzept der Kostenpotenzialkurven vorgestellt.

3.1.1 Ökonomische Bewertung

Zur ökonomischen Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen werden dynamische Methoden der Investitionsrechnung eingesetzt (Kapitalwert- und Annuitätenmethode). Diese betrachten im Gegensatz zu den statischen Methoden mehrere Perioden (Götze 2015). Bei der Kapitalwertmethode wird ein Investitionsobjekt, bspw. eine Energieeffizienzmaßnahme, finanzmathematisch bewertet. Zur Berücksichtigung der Zeitpräferenz, also des Werts einer Zahlung in einer bestimmten Periode, werden alle in zukünftigen Perioden anfallenden Zahlungsströme auf den Zeitpunkt t_0 diskontiert²⁷. Die diskontierten Zahlungsströme werden auch als Barwert bezeichnet. Unter Berücksichtigung der Investition zum Zeitpunkt t_0 sowie möglicher Liquidationserlöse zum Zeitpunkt T berechnet sich der Kapitalwert (engl. *net present value*, NPV) gemäß Formel 3-1 als Summe der Barwerte (Götze 2015).

²⁷ Diskontieren beschreibt die (finanz-)mathematische Operation des Abzinsens einer zukünftigen Zahlung auf einen definierten (häufig den gegenwärtigen) Zeitpunkt (Götze 2015).

$$NPV = -I_0 * \sum_{t=1}^T \left(\frac{Z_t}{(1+d)^t} \right) + L * (1+d)^{-T} \quad 3-1$$

mit

NPV	Kapitalwert [EUR]
I_0	Investition zum Zeitpunkt t_0 [EUR]
T	Ende des Betrachtungszeitraums $T \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$
t	Zeitpunkt im Betrachtungszeitraum mit $t \in \mathbb{N} \{1 \leq t \leq T\}$
Z_t	Zahlungsstrom zum Zeitpunkt t [EUR], mit $Z_t = EZ_t - AZ_t$, wobei EZ_t einer Einzahlung im Zeitpunkt t und AZ_t einer Auszahlung im Zeitpunkt t entspricht
d	Diskontierungsrate mit $d \in \mathbb{R}^+ \{0 \leq d \leq 1\}$ [-]
L	Restwert zum Zeitpunkt T [EUR]

Der Kapitalwert eines Investitionsobjekts kann mittels Annuitätenmethode in einen über den Betrachtungszeitraum konstanten Zahlungsstrom überführt werden. Dazu wird der Kapitalwert mit dem Wiedergewinnungsfaktor (teilweise auch Annuitätenfaktor genannt) multipliziert (s. Formel 3-2). Im Vergleich zum Kapitalwert ermöglicht die Annuität aufgrund des Bezugs zu einer Periode eine leichtere Interpretation (Götze 2015).

$$A = NPV * AF = NPV * \frac{(1+d)^T * d}{(1+d)^T - 1} \quad 3-2$$

mit

A	Annuität [EUR/a]
AF	Annuitätenfaktor mit $AF \in \mathbb{R}^+ [1/a]$

Weitere Methoden der Investitionsrechnung sind bspw. die Methode des internen Zinsfußes sowie die dynamische Amortisation. Diese sind nicht Teil dieser Arbeit, daher wird für weitere Informationen auf entsprechende Grundlagenliteratur verwiesen (u. a. Götze 2015).

3.1.2 Energetische Bewertung

Per definitionem ist die Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme (bei normalisiertem Nutzen) mit einer Energieeinsparung verbunden (s. Abschnitt 2.1.1). Die Berechnung der Energieeinsparung einer Energieeffizienzmaßnahme kann auf zwei Arten erfolgen. Der erste Ansatz ist praktisch orientiert. Es wird ein Vorher-Nachher-Vergleich an einem realen technischen System, bspw. einer Druckluftanlage, durchgeführt, um die Energieeinsparung nach Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme durch Messungen zu quantifizieren. Der zweite Ansatz ist theoretisch orientiert. Hier wird zwischen expertenbasierten und modellbasierten Bewertungen unterschieden (Kesicki 2010). Expertenbasierte Bewertungen stützen sich auf Experten-

schätzungen, wohingegen modellbasierte Bewertungen unter der Verwendung von Energiemodellen erzeugt werden (Kesicki 2010). McKane und Hasanbeigi (2011) verwendeten bspw. den expertenbasierten Ansatz zur Bestimmung der Energieeffizienzpotenziale von Antriebssystemen in den USA, Kanada, der EU, Brasilien, Thailand und Vietnam. Zur Bestimmung der Energieeinsparpotenziale der Energieeffizienzmaßnahmen wurde die Delphi-Methode²⁸ verwendet (McKane und Hasanbeigi 2011). Ein Beispiel für eine modellbasierte Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der deutschen Papierindustrie bieten Fleiter et al. (2012). Tabelle 3-1 fasst Vor- und Nachteile der vorgestellten Verfahren zur Quantifizierung der Energieeinsparpotenziale einer Energieeffizienzmaßnahme zusammen.

Tabelle 3-1: Vor- und Nachteile von Verfahren zur Quantifizierung des Energieeinsparpotenzials von Energieeffizienzmaßnahmen

		Theoretisch	
		Expertenbasiert	Modellbasiert
Vorteile	Berücksichtigung eines Real-systems	Einfache Anwendung	Einheitliches Referenzsystem ¹⁾
		Begrenzter Ressourcenaufwand	Möglichkeit zur Berücksichtigung von Unsicherheiten ¹⁾
Nachteile	Kein einheitliches Referenzsystem	Kein einheitliches Referenzsystem ¹⁾	Mangelnde Transparenz
	Großer Ressourcenaufwand zum Aufbau eines Prüfstands	Konzeptionelle Limitierung bei der Berücksichtigung technischer Details	Ergebnisgüte abhängig von Fähigkeiten des Modellierers
	Bewertung von Pfadabhängigkeiten nur mit hohem Ressourcenaufwand möglich	Keine Berücksichtigung von Wechselwirkungen ¹⁾	Annahme eines rationell handelnden Agenten (<i>homo oeconomicus</i> ²⁾) ¹⁾

¹⁾ (Kesicki 2010).

²⁾ Das Modell des ‚homo oeconomicus‘, vom lateinischen Begriff ‚hōmō oeconomicus‘ (Wirtschaftsmensch) abgeleitet, beschreibt in der neoklassischen Theorie einen rational agierenden Agenten, der das Ziel der Nutzenmaximierung verfolgt (Manstetten et al. 1998). Die neoklassische Theorie sowie das Modell des homo oeconomicus sind maßgeblich auf Adam Smith (1776) zurückzuführen.

Ein Vorteil der modellbasierten Bewertung stellt die Möglichkeit zur Berücksichtigung eines einheitlichen Referenzsystems dar. Dies ist sowohl bei der praktischen als auch bei der expertenbasierten Vorgehensweise nur bedingt möglich. Beispielsweise können bei der praktischen Messung am Prüfstand Abweichungen durch variierende Umgebungszustände (bspw. den Wetterbedingungen) auftreten, sodass es, wenn keine hinreichende Normalisierung der Energieverbräuche (bspw. durch die Berücksichtigung von Gradtagen) durchgeführt wird, zu Feh-

²⁸ Die Entwicklung der Delphi-Methode ist auf die 1950er Jahre zurückzuführen. Sie stellt eine Form der strukturierten Befragung von Expertengruppen zu komplexen Fragestellungen dar. Auch wenn unterschiedliche Formen der Delphi-Methode existieren, beinhalten diese i. d. R. eine Form des Feedbacks zu den individuellen Aussagen der Experten, eine Form der Bewertung der Ergebnisse der Expertengruppe, die Möglichkeit der Experten zur Meinungsadaptation sowie eine Form der Anonymität bei der Darlegung von Einschätzungen und Meinungen durch die befragten Experten (Linstone 1979 in Okoli und Pawlowski 2004).

lern bei der Berechnung der Energieeinsparung kommen kann. Ein Nachteil der modellbasierten Bewertung stellt die häufig vorliegende mangelnde Transparenz sowie die Abhängigkeit der Ergebnishöhe von den Fähigkeiten des jeweiligen Modellierers dar. Ferner werden die Vor- und Nachteile von Energiemodellen durch deren Topologie beeinflusst.

3.1.3 Kostenpotenzialkurven

Die Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen durch Kostenpotenzialkurven ist wesentlich auf die Dissertationsschrift *SUPPLY CURVES OF CONSERVED ENERGY* von Meier (1982) am Lawrence Berkeley National Laboratory sowie Arbeiten von Meier et al. (1983), Koomey et al. (1991), Rosenfeld et al. (1993) und Stoft (1995) zurückzuführen. Meier (1982) erarbeitete die Grundprinzipien der Energieeinsparangebotskurve (engl. *conservation supply curves*, CSC) als Vorreiter der Energieeinsparungskostenkurve. Die Energieeinsparangebotskurve bildet einen einheitlichen Rahmen zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen. Sie stellt die Energievermeidungskosten (engl. *cost of conserved energy*, CCE) einer Energieeffizienzmaßnahme in aufsteigender Reihung in Form einer diskreten Treppenfunktion dar (Meier 1982). Zur Berechnung der Energievermeidungskosten werden die annuisierten Investitionen durch das jährliche Energieeinsparpotenzial dividiert (s. Formel 3-3). Die Energievermeidungskosten besitzen somit einen energetischen und einen ökonomischen Bewertungsaspekt (Meier 1982).

$$CCE = \frac{I}{EEP} * \frac{d}{1 - (1 + d)^{-T}} \quad 3-3$$

mit

<i>CCE</i>	Energievermeidungskosten [EUR/MWh]
<i>I</i>	Investition [EUR]
<i>EEP</i>	Energieeinsparung [MWh/a]
<i>d</i>	Diskontierungsrate $d \in \mathbb{R}^+ \{0 \leq d \leq 1\}$ [-]
<i>T</i>	Länge des Betrachtungszeitraums [a]

Die Berechnung der Energievermeidungskosten ist unabhängig von den Energieträgerpreisen. Meier (1982) hält dies für besonders relevant, da die Energieträgerpreisentwicklung äußerst volatil sei und somit großen Einfluss auf die Energievermeidungskosten habe.²⁹ Abbildung 3-1 zeigt eine schematische Energieeinsparangebotskurve. Auf der Abszisse und der Ordinate werden das jährliche Energieeinsparpotenzial respektive die Energievermeidungskosten einer

²⁹ Die Energievermeidungskosten werden außerdem durch Annahmen zur Investition in eine Energieeffizienzmaßnahme sowie zum Energieeinsparpotenzial einer Energieeffizienzmaßnahme determiniert. Zwischen den Energievermeidungskosten und der Investition in eine Energieeffizienzmaßnahme besteht eine positive Proportionalität, d. h., ein Anstieg der Investition um 5 % führt ceteris paribus zu einem Anstieg der Energievermeidungskosten um ebenfalls 5 % (Meier 1982). Demgegenüber besteht zwischen den Energievermeidungskosten und dem Energieeinsparpotenzial eine reziproke Proportionalität, d. h., eine Verdopplung der Energieeinsparung führt ceteris paribus zu einer Halbierung der Energievermeidungskosten.

Energieeffizienzmaßnahme aufgetragen. Energieeffizienzmaßnahmen mit Energievermeidungskosten, die kleiner als der Energieträgerpreis sind, – in diesem Fall die Maßnahmen ① und ② – sind kosteneffizient (Meier 1982). Ein Vorteil dieser Darstellungsform sieht Meier (1982) in der Möglichkeit eines direkten Vergleichs der Kosten für die Beschaffung einer Energieeinheit und der Einsparung einer Energieeinheit.

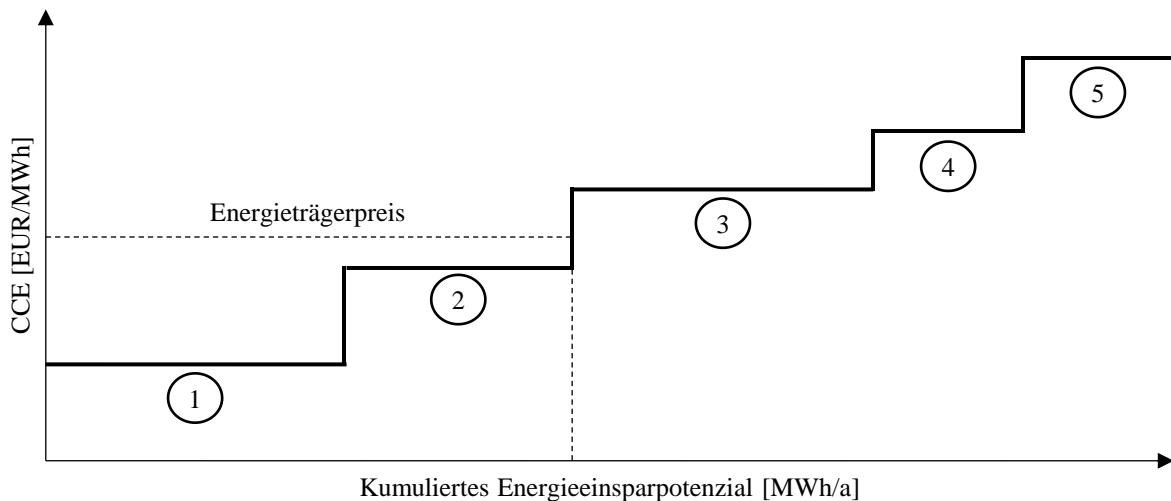


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung einer Energieeinsparangebotskurve (CSC)

Im Laufe der Jahre werden zur Berechnung der Energievermeidungskosten neben den Investitionen auch die jährlichen Betriebs- und Wartungskosten sowie die durch die Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme entstehenden Energiekosteneinsparungen berücksichtigt (Velthuisen 1995; Stoft 1995). Velthuisen (1995) argumentierte, dass zur Berechnung der Energievermeidungskosten der Barwert der Kosten und Erträge zu berechnen sei. Seit Beginn des 21. Jahrhunderts werden vermehrt Energieeinsparkostenkurven (EEKK)³⁰ (engl. *energy conservation cost curves*) eingesetzt. Energieeinsparkostenkurven stellen eine Erweiterung der Energieeinsparangebotskurven um die ökonomische Betrachtung dar (Brunke 2017). Energieeinsparangebotskurven berücksichtigen ausschließlich die Investition in eine Energieeffizienzmaßnahme, während Energieeinsparkostenkurven sowohl die Investition als auch die mit der Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme einhergehenden monetären Vorteile (bspw. Energiekostenreduktion durch Energieeinsparung) und Nachteile (bspw. Anstieg der laufenden

³⁰ Eine alternative Nutzungsform der Kostenpotenzialkurven wird von McKinsey&Company (2009) eingesetzt. Dabei werden anstelle von Energieeffizienzmaßnahmen CO₂-Vermeidungsmaßnahmen bewertet, entsprechend werden die Kostenpotenzialkurven hier als CO₂-Vermeidungskostenkurve (engl. *marginal abatement cost curves*, MACC) bezeichnet. Anstelle der Energieeinsparung wird die annuisierte Summe der Barwerte einer CO₂-Vermeidungsmaßnahme durch den jährlich eingesparten CO₂-Ausstoß dividiert. Diese Form der Kostenpotenzialkurven findet bis heute Einsatz in unterschiedlichen Bereichen aus Forschung, Politik und Wirtschaft. Sie wurden (und werden) sowohl von den USA als auch der EU als Werkzeug in den Diskussionen um Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen verwendet (Leviñh et al. 2014).

Kosten durch erhöhten Wartungsaufwand) einbeziehen (Brunke 2017). Die Energieeinsparungskostenkurve bildet ebenfalls eine Treppenfunktion diskreter Energieeffizienzmaßnahmen. Anstelle der Energievermeidungskosten werden die spezifischen Energieeinsparkosten (SEEK) einer Energieeffizienzmaßnahme absteigend sortiert aufgeführt. Die spezifischen Energieeinsparkosten berechnen sich aus dem annuisierten Kapitalwert einer Energieeffizienzmaßnahme, dividiert durch das jährliche Energieeinsparpotenzial (s. Formel 3-4).

$$SEEK = \frac{-AF * NPV}{EEP} \quad 3-4$$

mit

<i>SEEK</i>	Spezifische Energieeinsparkosten [EUR/MWh]
<i>AF</i>	Annuitätenfaktor mit $AF \in \mathbb{R}^+$ [1/a]
<i>NPV</i>	Kapitalwert [EUR]

Die Berechnung des Kapitalwerts variiert in unterschiedlichen Untersuchungen mitunter stark. Dies betrifft sowohl die verwendeten Zinssätze zur Diskontierung der Zahlungsströme auf einen Barwert als auch die neben der Investition berücksichtigten Kosten, also die jährlichen Ein- und Auszahlungen bei der Berechnung des Kapitalwerts sowie die Berücksichtigung möglicher Liquiditätserlöse. Während Meier (1982) in der ursprünglichen Definition der Energievermeidungskosten auf die Berechnung des Kapitalwerts verzichtet und ausschließlich die annuisierten Investitionen berücksichtigt, inkludieren Worrell et al. (2000) zur Berechnung der Energievermeidungskosten auch die mit der Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme einhergehenden Veränderungen der jährlichen Betriebs- und Wartungskosten. Worrell et al. (2003) untersuchten die mit der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen auftretenden nichtenergetischen Effekte und klassifizierten diese in folgende fünf Gruppen: (1) Reduktion der Abfälle, (2) Reduktion der Emissionen, (3) Reduktion der Betriebs- und Wartungsarbeiten, (4) Veränderungen der Produktqualität sowie (5) Verbesserung der Arbeitsplätze. Als weiteren nichtenergetischen Effekt identifizierten Brunke et al. (2014) den Anstieg der Produktivität.³¹ Die Integration dieser nichtenergetischen Effekte in die Kapitalwertberechnung ist methodisch nicht trivial, da eine hinreichende Quantifizierung etwaiger Kostenänderungen in vielen Fällen kaum möglich ist (Worrell et al. 2003). Entsprechend werden diese Faktoren zumeist vernachlässigt, was zu Fehleinschätzungen bei der Potenzialbewertung führen kann.

In Abbildung 3-2 ist ein Beispiel einer Energieeinsparungskostenkurve dargestellt. Es werden die spezifischen Energieeinsparkosten auf der Ordinate und das jährliche Energieeinsparpotenzial auf der Abszisse aufgetragen. Jede Stufe in einer Energieeinsparkostenkurve entspricht

³¹ Ein Beispiel stellt in diesem Zusammenhang die Nachrüstung eines Vorkalzinator am Drehrohrofen in der Zementindustrie dar. Durch die Vorwärmung des Heißmehls mit der verfügbaren Abwärme kommt es bereits im Vorkalzinator zur Kalzinierung bzw. Entsäuerung des Kalksteins. Dadurch kann die Produktionskapazität des Drehrohrofens bei gleichem Energieeinsatz erhöht werden (Brunke 2017).

einer der bewerteten Energieeffizienzmaßnahmen (①, ..., ⑤). In der Energieeinsparkostenkurve werden ausschließlich Kosten aufgetragen. Alle Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten sind unter den getroffenen Annahmen wirtschaftlich (EEM ① und ②). Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten sind unter den getroffenen Annahmen unwirtschaftlich (EEM ③ bis ⑤).

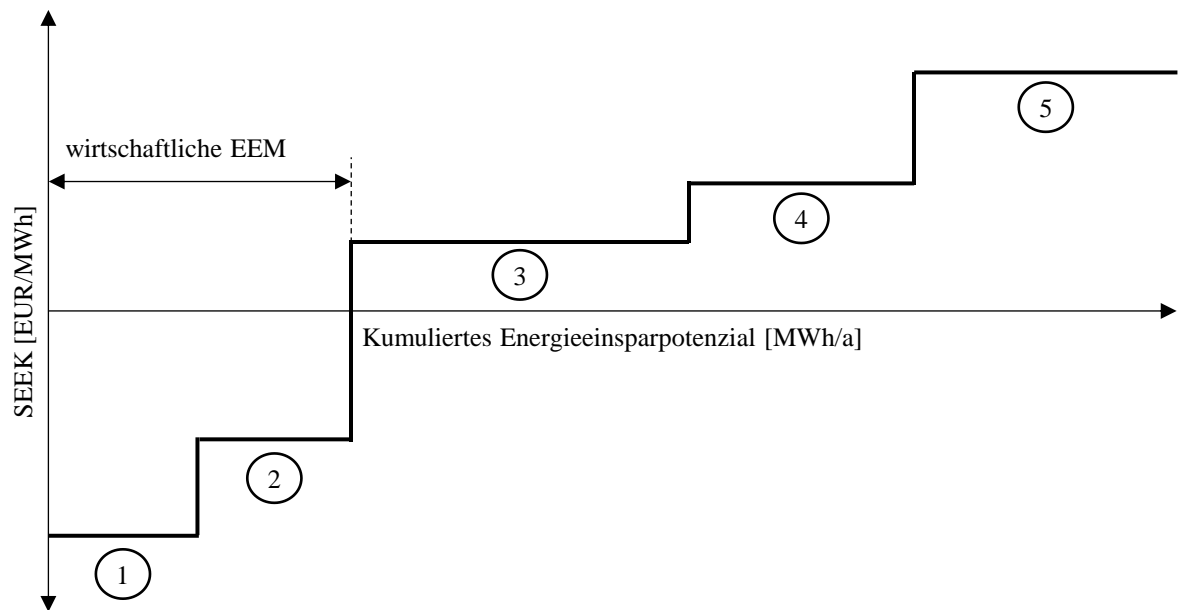


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung einer Energieeinsparkostenkurve (EEKK)

3.2 Einordnung bisheriger Forschungsarbeiten

Für die im Rahmen dieser Arbeit zu beantwortende Leitfrage sind im Wesentlichen bestehende Arbeiten der zwei folgenden Kategorien relevant (s. Tabelle 3-2, S. 35).

- **Potenzialanalysen:** Die Kategorie der Potenzialanalysen umfasst Forschungsarbeiten zur Quantifizierung von Energieeinsparpotenzialen durch eine gesteigerte Energieeffizienz im industriellen Kontext. Die Ergebnisse der Potenzialanalyse werden in Form von Kostenkurven dargestellt und beinhalten somit eine Form der energetischen und der ökonomischen Bewertung.
- **Energieflussanalysen:** Die Kategorie der Energieflussanalysen umfasst Forschungsarbeiten zur Bewertung von (Stoff- und) Energieflüssen in einem industriellen Energiesystem. Anhand der Energieflüsse werden durch den Modellanwender wahlweise mittels Parametervariation oder durch individuelle Analysen (bspw. durch Lastganganalysen) technische (und wirtschaftliche) Energieeinsparpotenziale identifiziert.

Zur Kategorie der **Potenzialanalysen** zählen unter anderem die Arbeiten von Miller (2019), Brunke (2017), Brunke und Blesl (2014a, 2014b), Morrow et al. (2014), Zhang et al. (2014), Li und Zhu (2014), Hasanbeigi et al. (2013; 2010a; 2010b), Fleiter et al. (2012; 2009) und

Worrell et al. (2000). Miller (2019) analysierte die wirtschaftlichen Energieeinsparpotenziale durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sowie während des Betriebs von IKT. Die Bewertung der Energieeinsparpotenziale erfolgte kennzahlenbasiert unter Verwendung des sequenziellen Bewertungsalgorithmus³² nach Meier (1982). Die Arbeiten von Brunke (2017) und Brunke und Blesl (2014a, 2014b) bewerteten die Energieeinsparpotenziale in den energieintensiven Branchen (Stahl-, Zement-, Papier-, Glas- und Chemieindustrie) der deutschen Industrie mittels Bottom-up-Ansatz. Dabei wurden die Potenziale standortspezifisch analysiert. Die Bewertung der Energieeinsparpotenziale erfolgte kennzahlenbasiert, Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen wurden mittels Korrekturfaktoren³² berücksichtigt. Morrow et al. (2014) bewerteten Energieeffizienzpotenziale in Indiens Zement- und Stahlindustrie, wobei Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen vernachlässigt wurden. Zhang et al. (2014) und Li und Zhu (2014) analysierten die Energieeinspar- und CO₂-Vermeidungspotenziale in der chinesischen Stahlindustrie. Der Schwerpunkt der Arbeiten von Hasanbeigi et al. (2013; 2010a; 2010b) lag in der Bewertung der Energieeinsparpotenziale der Zementindustrie in Thailand und China. Es wurde ebenfalls ein Bottom-up-Ansatz zur Quantifizierung der Energieeinsparpotenziale verwendet. Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen wurden vernachlässigt. Die Arbeiten von Fleiter et al. (2012; 2009) bewerteten die Energieeffizienzpotenziale in der deutschen Papierindustrie respektive den Industriesektoren der Europäischen Union (EU) mittels Bottom-up-Simulationsmodell. Zur Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen wurden wahlweise eine Form der sequenziellen Bewertung oder Korrekturfaktoren verwendet. Worrell et al. (2000) untersuchten die Energieeinsparpotenziale durch eine gesteigerte Energieeffizienz in der Zementindustrie der USA. Sie verwendeten einen Bottom-up-Ansatz und nutzten ebenfalls eine Form der sequenziellen Bewertung zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen. Bei der Analyse der Umsetzungsreihenfolge der Energieeffizienzmaßnahmen wurden technische Kriterien berücksichtigt.

Zur Kategorie der **Energieflussanalysen** zählen unter anderem die Forschungsarbeiten von Mousavi et al. (2016), Herrmann et al. (2011), Seow und Rahimifard (2011) sowie Herrmann und Thiede (2009). Diese Arbeiten führten keine Bewertung von Energieeinsparpotenzialen durch eine gesteigerte Energieeffizienz durch, befassten sich aber mit der Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in komplexen (industriellen) Systemen. Mousavi et al. (2016) verwendeten ein hierarchisches Modell zur Simulation und Visualisierung des Energieverbrauchs von Produktionsprozessen mit Schwerpunkt auf der Druckluft- und Dampfversorgung. Anhand ausgewählter Indikatoren wurde mittels Szenarioanalyse der Einfluss unterschiedlicher Produktionsraten auf den Energie- und Wasserverbrauch bewertet. In den Arbeiten von

³² Beschreibung s. Abschnitt 3.2.

Tabelle 3-2: Einordnung ausgewählter Forschungsarbeiten zur modellbasierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen im industriellen Kontext

Kriterium	Vorliegende Arbeit	Miller (2019)	Brunke (2017)	Brunke und Blesl (2014a, 2014b)	Morrow et al. (2014)	Zhang et al. (2014)	Li und Zhu (2014)	Hasanbeigi et al. (2013)	Fleiter et al. (2012)	Hasanbeigi et al. (2010a)	Hasanbeigi et al. (2010b)	Fleiter et al. (2009)	Worrell et al. (2000)	Mousavi et al. (2016)	Herrmann et al. (2011)	Seow und Rahimifard (2011)	Herrmann und Thiede (2009)
Fragestellung																	
Potenzialanalysen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
Energieflussanalysen	x													x	x	x	x
Kostenkurve¹⁾																	
CSC					x			x		x	x		x				
EEKK	x	x	x	x		x	x		x			x					
Schwerpunkt																	
Industrie	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Gebäude	x															x	
Sonstige		x															
Energiemodell																	
Zielsetzung ²⁾	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Systemgrenze																	
Stofflich ³⁾	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
Räumlich ⁴⁾	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	IN	N	L	L	L	L
Zeitlich ⁵⁾	M	M	L	L	M	M	M	M	L	M	M	M	.	K	K	K	K
Struktur des Modells																	
Modellierungsansatz ⁶⁾	BB	.	BB	BB	BA	BA*	BA*	BB	BB	BB	BB	BA	BA	BB	BB	BB	BB
Aggregationsniveau ⁷⁾	G	B*	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Mathematische Modellbeschreibung																	
Bestimmtheitsgrad ⁸⁾	d	d*	d	d	d*	d*	d*	d*	d*	d*	d*	d*	d*	.	.	.	.
Änderungsverhalten ⁹⁾	d	s*	s	s	s*	.	.	.	s*	.	.	s*	.	d	d	d	d
Modellanwendung ¹⁰⁾	SO	SO	S	S	S	.	S	S	SO	S	S	S	SO	S	S	S	S
Modellrelation ¹¹⁾	nl	.	nl	l	l*	.	l*	l	l*	l	l	l*	l*	.	.	.	.
Math. Lösungsverf. ¹²⁾	H	SB	K	K	E	.	E*	E	SB	E	E	K	SB	.	.	.	.

1) CSC: Energieeinsparangebotskurve; EEKK: Energieeinsparkostenkurve
 2) P: Prognose; S: Szenarioanalyse; B: Backcasting
 3) VM: Volkswirtschaftliches Modell; SM: Energiesystemmodell; AM: Energieangebotsmodell; NM: Energienachfragemodell
 4) G: Global; I: International; N: National; R: Regional; L: Lokal
 5) K: Kurzfristig; M: Mittelfristig; L: Langfristig
 6) T: Top-down; BA: Bottom-up aggregiertes Bestandsmodell; BB: Bottom-up explizites Bestandsmodell
 7) B: Blackbox; G: Greybox; W: Whitebox
 8) d: deterministisch; s: stochastisch
 9) s: statisch; d: dynamisch
 10) S: Simulation; O: Optimierung; SO: simulationsbasierte Optimierung; IO: Input-Output; G: Gleichgewicht; Ö: ökonomisch
 11) l: linear; MIP: gemischt-ganzzahlig; nl: nicht linear; dp: dynamische Programmierung
 12) N: numerisch; H: heuristisch; SB: sequenzielle Bewertung; K: Korrekturfaktor; E: Einzelbewertung

* Eigene Einschätzung basierend auf den verfügbaren Dokumentationen.
 . Aufgrund unvollständiger Dokumentationen konnten die im entwickelten Bewertungsrahmen enthaltenen Dimensionen nicht ermittelt werden.

Herrmann et al. (2011) und Herrmann und Thiede (2009) wurden Verfahren zur Entscheidungsunterstützung bei der systematischen Verbesserung von Produktionsprozessen entwickelt. Diese ermöglichen die Simulation und Visualisierung des Energieverbrauchs von Produktionsprozessen zur Identifikation von Energieeinsparpotenzialen. Die Identifikation dieser erfolgt bspw. durch Lastganganalysen zur Vermeidung von Stromspitzen. Auch Seow und Rahimifard (2011) entwickelten einen Bewertungsrahmen zur modellbasierten Berechnung des Energieverbrauchs industrieller Produktionsprozesse. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Analyse des Energieverbrauchs in Abhängigkeit des Produktdesigns.

Tabelle 3-2 bietet einen Überblick über die diskutierten Forschungsarbeiten im Hinblick auf die untersuchte Fragestellung, den Schwerpunkt sowie die Charakterisierung der eingesetzten Modelle im Vergleich zur vorliegenden Arbeit. Analog zur Einschätzung von Fleiter et al. (2011) wird in den modellbasierten Potenzialanalysen ein vermehrter Einsatz von Bottom-up-Modellen festgestellt. Mit Blick auf das Aggregationsniveau ist hier eine Dominanz der Black-box-Modelle zu erkennen. Hinsichtlich der eingesetzten mathematischen Lösungsverfahren werden zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen im Wesentlichen zwei Approximationsalgorithmen verwendet. Forschungsarbeiten mit dem Fokus auf der Analyse von Energieflüssen in industriellen Energieversorgungssystemen unter Berücksichtigung des dynamischen Systemverhaltens werden für die Bewertung lokaler Systeme oder Fallstudien eingesetzt. Die Identifikation von Energieeinsparpotenzialen erfordert in der Regel die händische Analyse durch den Modellanwender. Eine Potenzialanalyse für industrielle Energiesysteme unter adäquater Berücksichtigung der heterogenen Ausprägung des Anlagenbestands, der unterschiedlichen Lastzustände einzelner Verbraucher und der damit verbundenen dynamischen Effekte sowie der Wechselwirkungen zwischen Technologien und Energieeffizienzmaßnahmen liegt bisher nicht vor. Dazu wird im Rahmen dieser Arbeit ein generischer Modellierungsansatz zur Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt und mit einem heuristischen Optimierungsansatz gekoppelt (s. Kapitel 4).

3.3 Limitierungen bisheriger Bewertungsverfahren

Methoden zur ökonomischen Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen, deren Limitierungen und die daraus abgeleiteten Implikationen – etwa die Bedeutung nichtenergetischer Auswirkungen (z. B. Produktivitätsveränderungen), die Auswahl realitätsnaher Rahmenparameter (und deren Sensitivität) sowie die Berücksichtigung von Hemmnissen – werden in diversen Forschungsarbeiten kontrovers diskutiert. Dazu zählen u. a. die Arbeiten von Brunke (2017), die Arbeiten (unter Mitarbeit) von Kesicki³³, Fleiter et al. (2009), Worrell et al. (2003) sowie

³³ U. a. in Kesicki (2013b), Kesicki und Ekins (2012) sowie Kesicki und Strachan (2011).

die Arbeiten (unter Mitarbeit) von Meier³⁴. Nachfolgend werden daher ausschließlich bestehende Limitierungen bei der energetischen Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen diskutiert. Aufgrund der beschriebenen konzeptionellen Limitierungen der praktischen sowie der expertenbasierten Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen (s. Abschnitt 3.1.2) – insbesondere im Hinblick auf die Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen – liegt der Schwerpunkt im weiteren Verlauf auf Limitierungen der modellbasierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen. Mit Blick auf die in Abschnitt 1.2 formulierte Leitfrage sowie die daraus abgeleiteten Zielsetzungen steht vor allem die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen Vordergrund.

Modellierungsansatz

Diverse Forschungsarbeiten untersuchen den Einfluss des Modellierungsansatzes am Beispiel von CO₂-Vermeidungsmaßnahmen auf die CO₂-Vermeidungskosten (die Berechnung der CO₂-Vermeidungskosten erfolgt analog zur Berechnung der Energievermeidungskosten, s. Abschnitt 3.1.3). Kesicki (2013a, 2010) griff die Hypothese von Hourcade et al. (2006) hinsichtlich einer systematischen Unterschätzung der CO₂-Vermeidungskosten durch Bottom-up-Modelle und einer systematischen Überschätzung der CO₂-Vermeidungskosten durch Top-down-Modelle auf. Dabei sei die Unterschätzung der CO₂-Vermeidungskosten auf die fehlende Berücksichtigung von mikro- und makroökonomischen Rückkopplungen und die Überschätzung der CO₂-Vermeidungskosten auf die Abhängigkeit von historischen Daten zurückzuführen (Kesicki 2013a, 2010; Hourcade et al. 2006). In einer Metaanalyse von 62 Untersuchungen zu CO₂-Vermeidungsmaßnahmen konnten Kuik et al. (2009) diesen Zusammenhang nicht bestätigen. Im Hinblick auf die Berücksichtigung der technischen Wechselwirkung zwischen Energieeffizienzmaßnahmen konstatiert Kesicki (2010): „Both top-down and bottom-up models consistently, possibly not always accurately, take into account interactions between mitigation measures.“ Demgegenüber argumentieren Fleiter et al. (2011), dass infolge des fehlenden technischen Details in Top-down-Modellen eine Berücksichtigung technischer Wechselwirkungen nicht möglich sei. Überdies sind Top-down-Modelle aufgrund des hohen Aggregationsniveaus (van Beeck 1999) in der Möglichkeit zur Berücksichtigung physikalische Gesetzmäßigkeiten stark eingeschränkt (Böhringer und Rutherford 2008). Somit ist für die Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten der Bottom-up-Ansatz grundsätzlich besser geeignet. Innerhalb der Bottom-up-Modelle existieren aber signifikante Unterschiede (s. Abschnitt 2.2.3). Daher ist ferner zwischen Bottom-up-Modellen mit explizitem sowie aggregiertem Bestandsmodell zu differenzieren. Modelle mit explizitem Anlagen-

³⁴ U. a. in Meier et al. (1983) und Meier (1982).

bestand ermöglichen im Gegensatz zu Modellen mit aggregiertem Anlagenbestand die Berücksichtigung der technologiespezifischen Heterogenität (bspw. Technologiekonfigurationen und -dimensionierungen).

Kennzahlenbasierte Berechnung des Energieeinsparpotenzials

Jedes Energiemodell benötigt Daten. Diese können entweder in die Modellgleichungen integriert sein, d. h., sie werden endogen berechnet, oder sie werden durch den Modellanwender spezifiziert und dem Modell in Form exogener Annahmen zugeführt (van Beeck 1999). In den meisten Energiemodellen ist das Energieeinsparpotenzial einer Energieeffizienzmaßnahme eine exogene Annahme. Ein weit verbreitetes Konzept zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen stellt die Blackbox-Modellierung dar (u. a. Brunke 2017; Brunke und Blesl 2014a, 2014b; Hasanbeigi et al. 2013; Fleiter et al. 2012; Hasanbeigi et al. 2010a; Hasanbeigi et al. 2010b; Worrell et al. 2000). Die Berechnung des Energieeinsparpotenzials erfolgt kennzahlenbasiert. Ausgangspunkt ist typischerweise die Charakterisierung des Energieverbrauchs anhand der Produktion eines Guts oder einer Dienstleistung sowie des spezifischen Energieverbrauchs. Davon ausgehend werden zwei gängige Methoden zur Bestimmung des Energieeinsparpotenzials einer Energieeffizienzmaßnahme angewandt.

Die erste Methode ist die Verwendung eines **prozentualen Energieeinsparpotenzials** mit dem Energieverbrauch eines Referenzsystems als Bezugsgröße. Diese Methode wird typischerweise (aber nicht ausschließlich) für die Bewertung von Querschnittstechnologien oder Technologien ohne direkten Bezug zu einem Produkt (bspw. Rechenzentren) eingesetzt (u. a. Miller 2019; Kuder 2014). Beispielsweise wird das Energieeinsparpotenzial durch die Dimensionierung von Elektromotoren mit 2–10 % beziffert (McKane und Hasanbeigi 2011; da Costa Bortoni 2009; Berger et al. 2005). Dies ermöglicht eine transparente Dokumentation der getroffenen Annahmen zum Energieeinsparpotenzial einer Energieeffizienzmaßnahme. Die Berechnung der Energieeinsparung erfolgt demnach ungeachtet der technischen Gegebenheiten (bspw. Laufzeit, Auslastung, Alter) des Referenzsystems.

Die zweite Methode ist die **Reduktion der Energieintensität** eines Prozesses durch die Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme. Dieses Verfahren wird vielfach (aber nicht ausschließlich) für die Bewertung von Prozesstechnologien in der energieintensiven Industrie (bspw. Stahl-, Zement- und Glasindustrie) eingesetzt (u. a. Brunke und Blesl 2015, 2014a, 2014b; Arens und Worrell 2014; Morrow et al. 2014; Fleiter et al. 2013; Worrell et al. 2000). Das Energieeinsparpotenzial hat typischerweise die Menge eines produzierten Produkts als Bezugsgröße. Beispielsweise beziffern Brunke und Blesl (2014b) die Energieintensitätsreduktion durch den Einsatz einer Wärmerückgewinnung mittels ORC-Prozess in der Zementindustrie mit $31 \text{ MJ}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{Zement}}$. Analog zur Definition eines prozentualen Energieeinsparpotenzials besteht bei der Berechnung der Energieeinsparung auf Basis einer Energieintensitätsreduktion kein

direkter Bezug zu einer betrachteten Anlage. Brunke (2017) verwendete daher Korrekturfaktoren zur anlagenspezifischen Kalibrierung der Energieintensitätsreduktion.

Für beide Methoden ergibt sich *ceteris paribus* ein linearer Zusammenhang zwischen dem Energieeinsparpotenzial und dem Energieverbrauch des Referenzsystems. Die Zusammenhänge in einem realen technischen System sind aber selten linear. So ist die mechanische Antriebsleistung einer Kreiselpumpe näherungsweise proportional zur dritten Potenz der Drehzahl (Grundfos 2004). Folglich ist das Energieeinsparpotenzial durch den Einsatz einer Drehzahlregelung in Abhängigkeit der Auslastung einer Pumpe keinesfalls linear. Somit werden durch die Linearisierung nicht linearer Zusammenhänge Abweichungen in der Bewertung von Energieeinsparpotenzialen zugunsten einer geringeren Modellkomplexität in Kauf genommen. Sowohl für die Verwendung eines prozentualen Energieeinsparpotenzials als auch für die Verwendung von Energieintensitätsreduktionen erfolgt die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen mittels Approximationsalgorithmen.

Approximationsalgorithmen zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen

Bei der Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in Energiemodellen mit einem Blackbox-Modellierungsansatz werden vielfach drei unterschiedliche Approximationsalgorithmen eingesetzt. Diese sind die Einzelbewertung, die sequenzielle Bewertung und der Einsatz von paarweisen Korrekturfaktoren. Die sequenzielle Bewertung wird i. d. R. mit der prozentualen Berechnung des Energieeinsparpotenzials verbunden, während paarweise Korrekturfaktoren typischerweise bei der Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen mit der Berechnung des Energieeinsparpotenzials auf Basis einer Energieintensitätsreduktion eingesetzt werden.

Die **Einzelbewertung** wird sowohl in (linearen) Optimierungsmodellen als auch in Simulationsmodellen eingesetzt. Beispielsweise führte Kuder (2014) unter Verwendung des linearen Optimierungsmodells TIMES PanEU eine kennzahlenbasierte Einzelbewertung der Energieeffizienzpotenziale von Querschnittstechnologien durch. Hasanbeigi et al. (2013) bewerteten die Energieeffizienzpotenziale in der chinesischen Zementindustrie mit einem Bottom-up-Simulationsmodell unter der Annahme, „[...] that the energy efficiency measures are mutually exclusive and there is no interaction between them“ (Hasanbeigi et al. 2013). Die Verwendung der Einzelbewertung ermöglicht folglich keine Aussagen über das kumulierte Energieeinsparpotenzial mehrerer interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen.

Zur Bewertung mehrerer interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen entwickelte Meier (1982) die **sequenzielle Bewertung**. Die Vorgehensweise ist in vier Schritte unterteilt. Zunächst werden alle Energieeffizienzmaßnahmen basierend auf dem Ursprungssystem S_0 bewertet und in absteigender Reihung der Energievermeidungskosten sortiert. Anschließend wird die Energieeffizienzmaßnahme mit den geringsten Energievermeidungskosten umgesetzt und somit das neue Referenzsystem S_1 definiert. Basierend auf dem neuen Referenzsystem S_1 wer-

den die verbleibenden Energieeffizienzmaßnahmen erneut bewertet. Auf Basis der neuen Bewertung wird die Energieeffizienzmaßnahme mit den geringsten Energievermeidungskosten umgesetzt, sodass das Referenzsystem S_2 entsteht. Dieser iterative Bewertungsalgorithmus wird fortgesetzt, bis alle Energieeffizienzmaßnahmen umgesetzt sind. Meier (1982) bezeichnete das Ergebnis als den optimalen Investitionsplan (engl. *least-cost schedule*, LCS) (s. Formel 3-5). Ziel ist die Identifikation der kostenminimalen Umsetzungshierarchie einer Auswahl an Energieeffizienzmaßnahmen (Meier 1982).

$$LCS = \min \sum_{EEM_i} CCE_{EEM_i} * EEP_{EEM_i}, \forall EEM_i \in \tilde{U}^{EEM} \quad 3-5$$

mit

i	Generischer Index der Gleichungen mit $i \in \mathbb{N}\{1, \dots, I\}$
LCS	Optimaler Investitionsplan [EUR/a]
EEM_i	Energieeffizienzmaßnahme
CCE_{EEM_i}	Energievermeidungskosten der EEM_i [EUR/MWh]
EEP_{EEM_i}	Energieeinsparung der EEM_i [MWh/a]

und der Menge

\tilde{U}^{EEM} Alle betrachteten Energieeffizienzmaßnahmen

Die sequenzielle Bewertung wurde u. a. von Miller (2019), Fleiter et al. (2012) und Worrell et al. (2000) eingesetzt. Das Energieeinsparpotenzial einer Energieeffizienzmaßnahme ist abhängig von der Position in der Umsetzungshierarchie und errechnet sich gemäß Formel 3-6.

$$EEP_{EEM_i} = \begin{cases} EEV_0 * EEP_{p_{EEM_i}}^{UH} & \text{für } p_{EEM_i} = 1 \\ EEV_0 * EEP_{p_{EEM_i}}^{UH} * \prod_{j=1}^x (100\% - EEP_{p_{EEM_i-j}}^{UH}) & \text{für } p_{EEM_i} > 1 \end{cases} \quad 3-6$$

mit

$$x = p_{EEM_i} - 1$$

und

EEV_0	Energieverbrauch des Ursprungssystems [MWh/a]
$EEP_{p_{EEM_i}}^{UH}$	Energieeinsparpotenzial der in der Umsetzungshierarchie (UH) an der Stelle p_{EEM_i} stehenden Energieeffizienzmaßnahme EEM_i [%]
p_{EEM_i}	Position der EEM_i in der Umsetzungshierarchie (UH) mit $p_{EEM_i} \in \mathbb{N}$

Die Bestimmung der Umsetzungshierarchie erfolgt typischerweise anhand der spezifischen Energieeinsparkosten bzw. der Energievermeidungskosten (Miller 2019). Durch die Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme reduziert sich der Energieverbrauch des Referenzsystems. Das kumulierte Energieeinsparpotenzial der umgesetzten Energieeffizienzmaßnahmen

ist faktoriell zunehmend. Fleiter et al. (2012) argumentierten, dass durch die sequenzielle Bewertung Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen berücksichtigt werden, wohlwissend, „[...] that] this approach is clearly a simplification of the real circumstances [...]“. Dabei zeigte Stoff (1995), dass zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen die Berechnung (nahezu) aller Maßnahmenkombinationen erforderlich ist und der durch die sequenzielle Bewertung bestimmte optimale Investitionsplan tatsächlich nicht immer optimal ist. Ferner führt bei der Verwendung der sequenziellen Bewertung eine schlechtere Position in der Umsetzungshierarchie aufgrund des neuen Bezugssystems zu einem reduzierten Energieeinsparpotenzial und somit zu einer reduzierten Wirtschaftlichkeit (Hasanbeigi et al. 2010a). Dadurch werden die ohnehin wirtschaftlichen Energieeffizienzmaßnahmen im Vergleich zu den teureren Energieeffizienzmaßnahmen bevorzugt (Fleiter et al. 2009). Auch eine Berücksichtigung strategischer Entscheidungen bzw. technischer Restriktionen ist bei der sequenziellen Bewertung nicht vorgesehen (Fleiter et al. 2009). Dabei ist beispielsweise ein vorzeitiger Wechsel einer Pumpe aufgrund der größten Wirtschaftlichkeit nicht sinnvoll, wenn durch weitere Maßnahmen der Volumenstrom reduziert und somit eine kleinere Dimensionierung gewählt werden kann. Entgegen der Einschätzung von Fleiter et al. (2009) geben Worrell et al. (2000) an, im Rahmen der sequenziellen Bewertung technische Restriktionen zu berücksichtigen.

Als Alternative zur sequenziellen Bewertung verwendeten etwa Brunke (2017) und Fleiter et al. (2009) **paarweise Korrekturfaktoren** zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen. Diese werden mit einer Berechnung des Energieeinsparpotenzials unter Verwendung einer Energieintensitätsreduktion kombiniert (s. Formel 3-7).

$$EEP_{EEM_i} = \begin{cases} KAP * AUS * EIR_{p_{EEM_i}}^{UH} & \text{für } p_{EEM_i} = 1 \\ KAP * AUS * EIR_{p_{EEM_i}}^{UH} * \prod_{j=1}^x (100\% - w_{p_{EEM_i}, p_{EEM_i-j}}) & \text{für } p_{EEM_i} > 1 \end{cases} \quad 3-7$$

mit

$$x = p_{EEM_i} - 1$$

und

KAP	Kapazität der Produktionsanlage [t/a]
AUS	Auslastung der Produktionsanlage [%]
$EIR_{p_{EEM_i}}^{UH}$	Energieintensitätsreduktion der in der Umsetzungshierarchie (UH) an der Stelle p_{EEM_i} stehenden Energieeffizienzmaßnahme EEM_i [MWh/t]
$w_{p_{EEM_i}, p_{EEM_i-j}}$	Paarweiser Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Wechselwirkungen der in der Umsetzungshierarchie (UH) an der Stelle p_{EEM_i} stehenden Energieeffizienzmaßnahme EEM_i , wenn bereits die in der Umsetzungshierarchie (UH) an der Stelle $p_{EEM_i} - j$ stehende Energieeffizienzmaßnahme umgesetzt wurde [%]

Zur Berechnung des Energieeinsparpotenzials einer Energieeffizienzmaßnahme wird das Energieeinsparpotenzial der Einzelbewertung mit allen paarweisen Korrekturfaktoren der bereits umgesetzten Energieeffizienzmaßnahmen multipliziert. Die Definition der Umsetzungshierarchie erfolgt wahlweise anhand technischer oder ökonomischer Kriterien. Sowohl Brunke (2017) als auch Fleiter et al. (2009) bestimmten die Korrekturfaktoren nach folgendem Schema: „Führt bspw. die Umsetzung einer Maßnahme A zu einer Energieintensitätsreduktion eines Produktionsprozesses um 10 %, wird angenommen, dass eine weitere Maßnahme B noch 90 % ihrer Energieintensitätsreduktion im betreffenden Produktionsprozess gegenüber dem Ausgangszustand bewirken kann“ (Brunke 2017). In diesem Fall lässt sich die Berechnung des Energieeinsparpotenzials auf Basis einer Energieintensitätsreduktion in Kombination mit der Verwendung von Korrekturfaktoren (s. Formel 3-8, Zeile 1) durch eine Erweiterung mit dem spezifischen Energieverbrauch (SEC) in die sequenzielle Bewertung in Kombination mit einem prozentualen Energieeinsparpotenzial überführen (s. Formel 3-8, Zeile 4).

$$\begin{aligned}
 EEP_{PEEM_i} &= \begin{cases} KAP * AUS * EIR_{PEEM_i}^{UH} & \text{für } p_{PEEM_i} = 1 \\ KAP * AUS * EIR_{PEEM_i}^{UH} * \prod_{j=1}^x (100\% - w_{p_{PEEM_i}, p_{PEEM_i-j}}) & \text{für } p_{PEEM_i} > 1 \end{cases} \\
 &= \begin{cases} KAP * AUS * EIR_{PEEM_i}^{UH} * \frac{SEC}{SEC} & \text{für } p_{PEEM_i} = 1 \\ KAP * AUS * EIR_{PEEM_i}^{UH} * \prod_{j=1}^x (100\% - w_{p_{PEEM_i}, p_{PEEM_i-j}}) * \frac{SEC}{SEC} & \text{für } p_{PEEM_i} > 1 \end{cases} \quad 3-8 \\
 &= \begin{cases} KAP * AUS * SEC * \frac{EIR_{PEEM_i}^{UH}}{SEC} & \text{für } p_{PEEM_i} = 1 \\ KAP * AUS * SEC * \frac{EIR_{PEEM_i}^{UH}}{SEC} * \prod_{j=1}^x \left(100\% - \frac{EIR_{PEEM_i-j}^{UH}}{SEC}\right) & \text{für } p_{PEEM_i} > 1 \end{cases} \\
 &= \begin{cases} EEV_0 * EEP_{PEEM_i}^{UH} & \text{für } p_{PEEM_i} = 1 \\ EEV_0 * EEP_{PEEM_i}^{UH} * \prod_{j=1}^x (100\% - EEP_{PEEM_i-j}^{UH}) & \text{für } p_{PEEM_i} > 1 \end{cases}
 \end{aligned}$$

mit

$$x = p_{PEEM_i} - 1 \quad 3-9$$

$$w_{p_{PEEM_i}, p_{PEEM_i-j}} = \frac{EIR_{PEEM_i-j}^{UH}}{SEC} * 100\% = EEP_{PEEM_i-j}^{UH} \quad 3-10$$

$$EEV_0 = KAP * AUS * SEC \quad 3-11$$

Somit ist es – unter der Annahme einer identischen Umsetzungsreihenfolge – mit Blick auf die Bewertung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen unter methodischen Gesichtspunkten irrelevant, ob die Methode der sequenziellen Bewertung in Kombination mit prozentualem Energieeinsparpotenzial (i. F. als statisch-faktorielle Bewertung bezeichnet) oder die Methode der paarweisen Korrekturfaktoren mit einer Energieintensitätsreduktion eingesetzt wird. Methodische Unterschiede können lediglich auftreten, wenn sich die mittels sequenzieller Bewertung bestimmte Umsetzungshierarchie von der bei der Verwendung von Korrekturfaktoren definierten Umsetzungshierarchie unterscheidet.

4 Methodische Weiterentwicklung der Bewertungsverfahren

Anknüpfend an die formulierte Leitfrage sowie die daraus resultierenden Zielsetzungen (vgl. Ziel I, Abschnitt 1.2) wird im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren zur integrierten Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt. Ausgangspunkt für die Entwicklung ist die Identifikation und Diskussion der Limitierungen bisheriger Bewertungsverfahren in Abschnitt 3.2. Tabelle 4-1 fasst die wesentlichen Modellausprägungen unter Verwendung des in Abschnitt 2.2 definierten Bewertungsrahmens zur Klassifizierung mathematischer Energiemodelle zusammen. Das entwickelte Verfahren ist insbesondere zur Anwendung in Energienachfragemodellen geeignet. Die räumliche Abgrenzung reicht von lokalen Untersuchungen bis hin zu Modellen mit (inter-)nationalem Schwerpunkt. Die limitierenden Faktoren stellen hier die Datenverfügbarkeit sowie die Rechendauer dar. Aufgrund des starken Fokus auf unterschiedliche Technologien sowie der Einnahme einer betriebswirtschaftlichen Perspektive bei der ökonomischen Bewertung ist der Betrachtungshorizont typischerweise kurz- bis mittelfristig (5–20 Jahre). Für die Identifikation einer (nahezu) kostenoptimalen Maßnahmenkombination wird ein heuristischer Optimierungsalgorithmus eingesetzt.

Tabelle 4-1: Zusammenfassung der Modelleigenschaften zur integrierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen

Kategorie/Dimension	Ausprägung
Zielsetzung	Szenarioanalyse zu Energieeffizienzpotenzialen
Systemgrenze	
stoffliche Abgrenzung	Energienachfragemodelle
räumliche Abgrenzung	(inter-)national, regional, lokal
zeitliche Abgrenzung	kurz- bis mittelfristig
Modellstruktur	
Modellierungsansatz	Bottom-up-Ansatz
Aggregationsniveau	Greybox-Modell
Mathematische Modellbeschreibung	
Bestimmtheitsgrad	deterministisch
zeitlicher Bezug	dynamisch
Art der Modellanwendung	simulationsbasierte Optimierung
Art der Modellrelation (Programmierung)	nicht linear
mathematisches Lösungsverfahren	Heuristik ¹⁾

¹⁾ Die Begründung für die Verwendung eines heuristischen Optimierungsalgorithmus erfolgt in Abschnitt 4.2.

Die Modellstruktur sowie die modellbasierte Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen werden in Abschnitt 4.1 erläutert. Anschließend erfolgt in Abschnitt 4.2 eine Beschreibung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten heuristischen Optimierungsalgorithmus zur Bewertung interagierender Energieeffizienzmaßnahmen. Zuletzt werden in Abschnitt 4.3 die Formalismen zur Berechnung der spezifischen Energieeinsparkkosten dargelegt. Das Verfahren zur integrierten Bewertung wurde auszugswise in Flatau und Radgen (2017) veröffentlicht.

4.1 Modellbasierte Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen

Zur modellbasierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen wird ein technologieorientierter Bottom-up-Ansatz mit einem heuristischen Optimierungsalgorithmus verbunden. Wesentliche Bestandteile des Modells sind die Bestandsmodellierung zur Berücksichtigung der heterogenen Ausprägung realer Systeme und der versunkenen Kosten (engl. *sunk costs*)³⁵ sowie die integrale Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen innerhalb eines Systems. Zur Quantifizierung der Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen auf Basis kausaler Zusammenhänge erfolgt eine detaillierte Technologiemonitoringmodellierung. Zugleich wird die endogene Berechnung des Endenergieeinsparpotenzials einer Energieeffizienzmaßnahme implementiert. In bestehenden Forschungsarbeiten wird dies typischerweise als exogener Parameter vorgegeben (s. Abschnitt 3.1). Durch die Endogenisierung können einerseits unterschiedliche Technologiekonfigurationen und Lastzustände sowie andererseits der Einfluss von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen berücksichtigt und quantifiziert werden.

Struktur des Modells

Zur Berücksichtigung technologiespezifischer Daten bei der Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen wird ein Bottom-up-Ansatz verwendet. Im Gegensatz zu einer Technologieklassifizierung zu unterschiedlichen Größen- und Altersklassen werden die Technologien zu Systemen zusammengefasst. Diese werden als hierarchisch strukturierte, zeitdiskrete Systeme beschrieben (Augenstein 2009; Zeigler et al. 1976). Zur Systembeschreibung werden fünf Hierarchieebenen definiert (s. Abbildung 4-1). Diese sind das Verbundsystem, die Verfahrensstufe, der Verfahrensschritt, die Prozessgruppe und der Prozessschritt. Die Definition der Hierarchieebenen erfolgt in Anlehnung an Mousavi et al. (2016), Duflou et al. (2012), Augenstein (2009) und Gruhn et al. (1976). Nachfolgend werden die fünf Hierarchieebenen, beginnend beim Prozessschritt hin zum Verbundsystem (von unten nach oben), beschrieben.

Die kleinste Einheit eines Systems stellt der **Prozessschritt** dar (bspw. ein Elektromotor oder eine Pumpe). Die Verbindung zu vor- bzw. nachgelagerten Prozessschritten erfolgt über ein- und ausgangsseitige Güterströme (bzw. Güterflüsse). Ein Gut (engl. *commodity*) kann beispielsweise ein Energieträger, eine Energiedienstleistung, ein Material oder ein Produkt sein. Ein Gut kann durch einen oder mehrere Prozessschritte erzeugt und durch einen oder mehrere andere Prozessschritte konsumiert werden (Loulou et al. 2016). Jeder Prozessschritt ist eindeutig über den Vektor ε zu identifizieren. Zur individuellen Charakterisierung eines Prozess-

³⁵ Die versunkenen Kosten (engl. *sunk costs*) stellen irreversibel vordisponierte Kosten dar. Diese sind auf Handlungen in vorangegangenen Perioden zurückzuführen und können nicht widerrufen werden (Clark und Wrigley 1995). Dazu zählen u. a. die unumkehrbar anfallenden Kosten für den Technologie-/Anlagenbestand.

Ebene

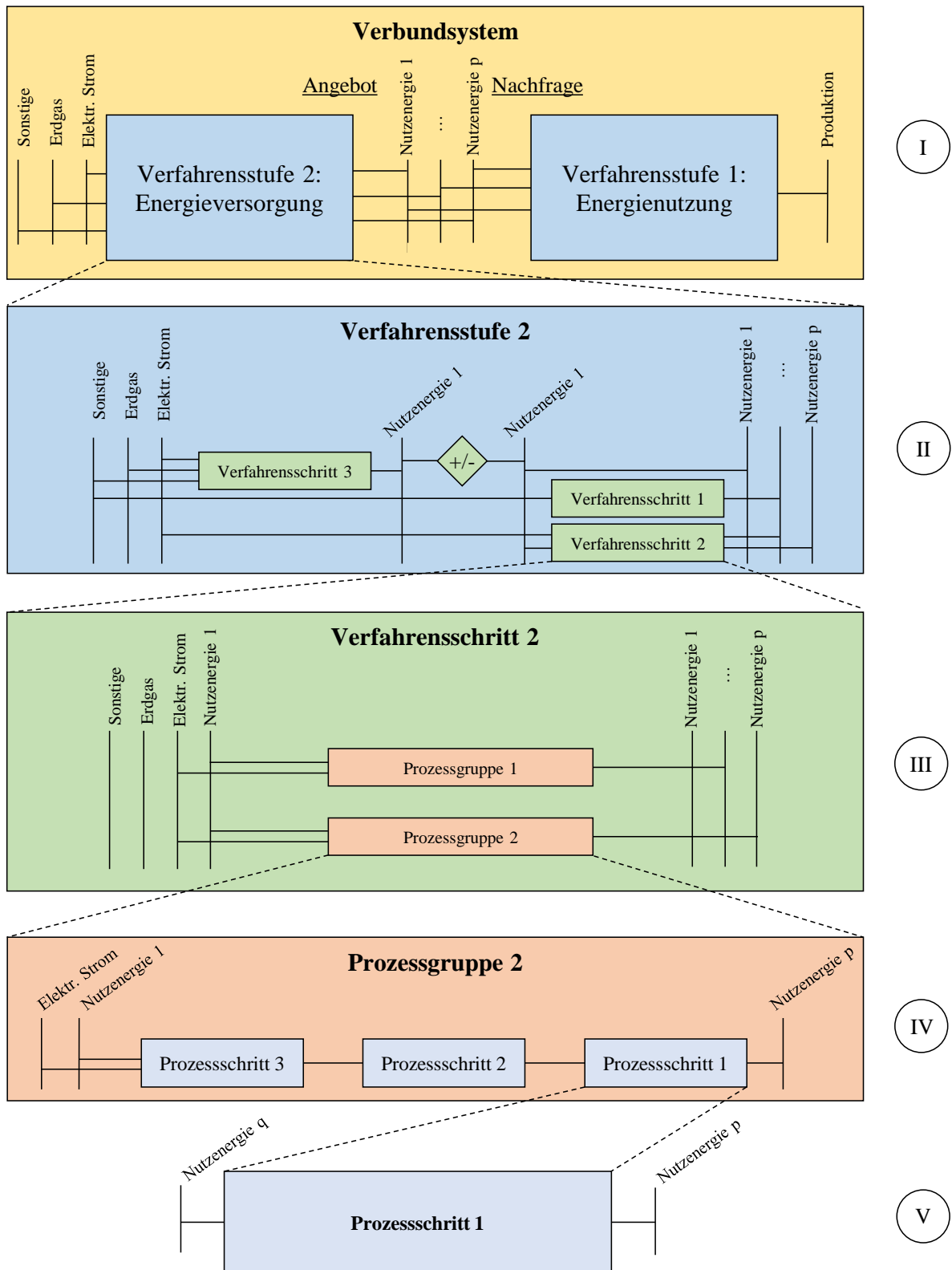


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der hierarchischen Struktur eines Verbundsystems

schritts ε dienen die technischen Daten $\tilde{\Psi}_\varepsilon^{PS}$. Ein Prozessschritt kann ein oder mehrere ausgangsseitige Güterflüsse besitzen. Die ausgangsseitigen Güterflüsse $\Gamma_{\varepsilon,j}^{PS}$ sind Funktionen der eingangsseitigen Güterflüsse sowie der technischen Daten des Prozessschritts. Dabei entspricht $\tilde{\Omega}_\varepsilon^{PS}$ der Menge der eingangsseitigen Güterflüsse eines Prozessschritts ε (s. Formel 4-1).

$$\Gamma_{\varepsilon,j_\varepsilon}^{PS} = f_{j_\varepsilon}(\tilde{\Psi}_\varepsilon^{PS}, \tilde{\Omega}_\varepsilon^{PS}) \quad , \forall j_\varepsilon \in \mathbb{N}\{1, \dots, J_\varepsilon\} \quad 4-1$$

mit

ε	$\varepsilon \in \tilde{S}^{VS} \times \tilde{S}^{VG} \times \tilde{S}^{VT} \times \tilde{S}^{PG} \times \tilde{S}^{PS}$
J_ε	Anzahl der ausgangsseitigen Güterflüsse des Prozessschritts ε
$\Gamma_{\varepsilon,j_\varepsilon}^{PS}$	Ausgangsseitige Güterflüsse j_ε des Prozessschritts ε

und den Mengen

\tilde{S}^{VS}	Alle betrachteten Verbundsysteme
\tilde{S}^{VG}	Alle betrachteten Verfahrensstufen
\tilde{S}^{VT}	Alle betrachteten Verfahrensschritte
\tilde{S}^{PG}	Alle betrachteten Prozessgruppen
\tilde{S}^{PS}	Alle betrachteten Prozessschritte
$\tilde{\Psi}_\varepsilon^{PS}$	Technische Daten des Prozessschritts ε
$\tilde{\Omega}_\varepsilon^{PS}$	Eingangsseitige Güterflüsse des Prozessschritts ε

Mehrere im Verbund betriebene Prozessschritte bilden eine **Prozessgruppe**. Jede Prozessgruppe ist eindeutig über den Vektor δ (mit $\delta \in \tilde{S}^{VS} \times \tilde{S}^{VG} \times \tilde{S}^{VT} \times \tilde{S}^{PG}$) zu identifizieren. Eine Prozessgruppe stellt eine Folge von Prozessschritten mit definierten Relationen dar (bspw. ein Pumpensystem bestehend aus den Prozessschritten Elektromotor und Pumpe). Die funktionalen Zusammenhänge einer Prozessgruppe werden durch die Struktur der Prozessschritte in einer Prozessgruppe definiert. Die Menge der technischen Daten einer Prozessgruppe entspricht der Vereinigung der Mengen der technischen Daten der innerhalb einer Prozessgruppe enthaltenen Prozessschritte. Abbildung 4-2 verdeutlicht schematisch die zuvor dargestellten Zusammenhänge zur Aggregation von im Verbund betriebenen Prozessschritten zu einer Prozessgruppe. Für eine bessere Darstellbarkeit werden zwei Prozessschritte mit jeweils einem eingangs- und ausgangsseitigen Güterfluss dargestellt.

Mehrere Prozessgruppen werden zu einem **Verfahrensschritt** zusammengefasst. Zwischen den Prozessgruppen innerhalb eines Verfahrensschritts bestehen keine Relationen. Somit können die innerhalb eines Verfahrensschritts enthaltenen Prozessgruppen individuell bewertet werden. Außerdem werden ausschließlich die Prozessgruppen aggregiert, die keine Verbindung zu nachgelagerten Verfahrensschritten haben oder eine Verbindung zu den gleichen nachgelagerten Verfahrensschritten aufweisen. Dies ermöglicht die sequenzielle Anordnung interagierender Verfahrensschritte. Jeder Verfahrensschritt ist eindeutig über den Vektor γ (mit $\gamma \in \tilde{S}^{VS} \times \tilde{S}^{VG} \times \tilde{S}^{VT}$) zu identifizieren. Da zwischen den Prozessgruppen eines Verfahrens-

schritts keine Relationen bestehen, sind die ausgangsseitigen Güterflüsse eines Verfahrensschritts ausschließlich Funktionen der technischen Daten sowie der eingangsseitigen Güterflüsse der im Verfahrensschritt enthaltenen Prozessgruppen.

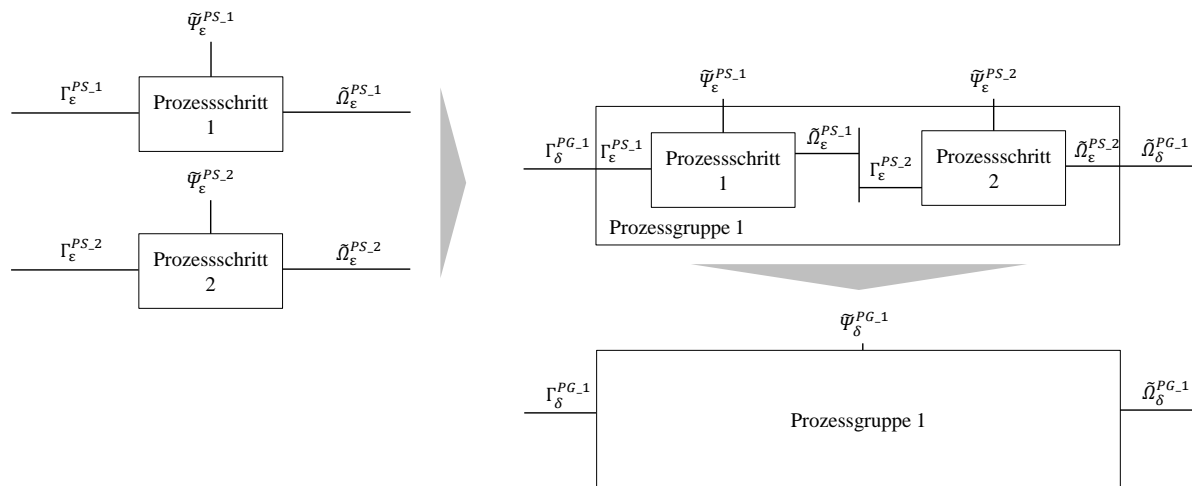


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Aggregation von zwei Prozessschritten zu einer Prozessgruppe

Als nächsthöhere Ebene werden die Verfahrensschritte zu einer **Verfahrensstufe** zusammengefasst. Im industriellen Kontext lassen sich zwei Arten von Verfahrensstufen unterscheiden: einerseits Verfahrensstufen der Energieversorgung und andererseits Verfahrensstufen der Energienutzung. In Verfahrensstufen der Energieversorgung wird „[...] die vom Markt bezogene Endenergie um[ge]wandelt, transportiert, [ge]speichert und [...] als [Nutz]energie den energieverbrauchenden Prozessen [...] bedarfsgerecht zur Verfügung [ge]stellt“ (Augenstein 2009). In den Verfahrensstufen der Energienutzung wird Nutzenergie umgewandelt, um eine Energiedienstleistung zu erbringen (Augenstein 2009). Zwischen den Verfahrensschritten in einer Verfahrensstufe bestehen definierte Relationen. Die Anordnung der Verfahrensschritte erfolgt von der Energiedienstleistung zum Endenergiebedarf. In einem Energieversorgungssystem, in dem beispielsweise keine Verbindung zwischen der Kälte- und Druckluftbereitstellung existiert, können diese Prozessgruppen zu einem Verfahrensschritt zusammengefasst werden. Ein nachgelagerter Verfahrensschritt ist etwa die Gebäudebeheizung. Durch den Wärmeintrag in die Gebäudeinfrastruktur haben sowohl die Druckluft- als auch die Kälteversorgung Einfluss auf den Heizbedarf. Jede Verfahrensstufe ist eindeutig über den Vektor β (mit $\beta \in \tilde{S}^{VS} \times \tilde{S}^{VG}$) zu identifizieren. Die funktionalen Zusammenhänge einer Verfahrensstufe werden durch die Struktur der Verfahrensschritte in einer Verfahrensstufe definiert.

Mehrere Verfahrensstufen werden zu einem **Verbundsystem** zusammengefasst. Das Verbundsystem ist die oberste Hierarchieebene. Ein Verbundsystem ist ein geschlossenes System ohne Verbindung zu weiteren Verbundsystemen. Jedes Verbundsystem ist eindeutig über den Vektor α (mit $\alpha \in \tilde{S}^{VS}$) identifizierbar. Die ausgangsseitigen Flüsse eines Verbundsystems sind Funktionen der eingangsseitigen Güterflüsse, der technischen Daten und der Struktur der im

Verbundsystem enthaltenen Verfahrensstufen. Die Systemdekomposition eines Verbundsystems erfolgt in Abhängigkeit der Systemkomplexität und der Zielsetzung einer Untersuchung.

Aggregationsniveau

Jeder Prozessschritt eines Systems wird durch ein generisches Modul implementiert. Dadurch kann ein Prozessschritt Anwendung in unterschiedlichen Prozessgruppen finden. Dies ermöglicht eine einfache und individuelle Gestaltung der Prozessgruppen. Die Verbindung unterschiedlicher Prozessschritte erfolgt über die jeweiligen Flüsse eines Guts (s. Abbildung 4-3). Beispielsweise stellt die mechanische Arbeit, als ausgangsseitiger Güterfluss des Prozessschritts Druckluftbereitstellung, den eingangsseitigen Güterfluss des Prozessschritts Elektromotor dar. Die Richtung der Berechnungslogik innerhalb einer Prozessgruppe ist der physikalischen Energieflussrichtung entgegengesetzt.

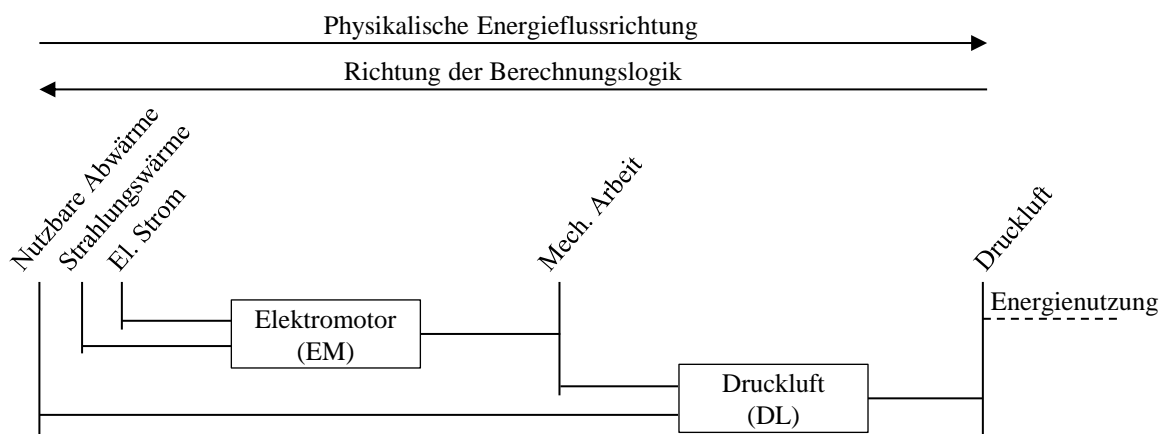


Abbildung 4-3: Systematik der Verbindung unterschiedlicher Prozessschritte durch Flüsse

Das Aggregationsniveau zur Beschreibung der funktionalen Zusammenhänge wird für jeden Prozessschritt individuell und in Abhängigkeit der identifizierten Energieeffizienzmaßnahmen gewählt (Greybox-Ansatz). Ziel ist die Beschreibung der funktionalen Zusammenhänge eines Prozessschritts auf Basis der für die Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen relevanten physikalischen Gesetzmäßigkeiten. In diesem Fall basiert die Reaktion eines Prozessschritts durch Änderungen der eingangsseitigen Güterflüsse oder der prozessschrittsspezifischen Technologiedaten auf kausalen Zusammenhängen. Aufgrund der Komplexität realer Systeme wird nicht jede Relation ausschließlich durch physikalische Gesetzmäßigkeiten beschrieben. Beispielsweise ist eine modelltechnische Abbildung von Degradationseffekten durch Verschmutzung und Abnutzung kaum anhand physikalischer Gesetzmäßigkeiten möglich, da diese von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren (Luftreinheit, Anwendungsgebiet etc.) abhängen. Eine Alternative bietet hier beispielsweise die kennzahlenbasierte Berücksichtigung von Degradationseffekten. Die Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme erfolgt durch eine Ver-

änderung der prozessschrittspezifischen Technologiedaten des jeweiligen Prozessschritts innerhalb einer Prozessgruppe. Die Veränderungen des Endenergieverbrauchs durch die Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme sind das Resultat der funktionalen Zusammenhänge einer Prozessgruppe. Das Endenergieeinsparpotenzial wird endogen berechnet. Durch die simultane Variation mehrerer prozessschrittspezifischer Technologiedaten wird der Einfluss der Interaktionen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen quantifiziert. Der Einfluss durch die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen in vorangegangenen Prozessschritten wird durch die integrale Bewertung einer Prozessgruppe berücksichtigt. Die Berechnung der Endenergieeinsparung einer Energieeffizienzmaßnahme erfolgt durch einen Vergleich des Endenergieverbrauchs vor und nach deren Umsetzung (*ceteris paribus*³⁶). Für die in der Umsetzungshierarchie an erster Stelle stehende Energieeffizienzmaßnahme dient der Ausgangsendenergieverbrauch des Verbundsystems als Referenz. Für alle weiteren Energieeffizienzmaßnahmen werden bei der Berechnung des Endenergieeinsparpotenzials die bereits umgesetzten Energieeffizienzmaßnahmen berücksichtigt. Führt eine Energieeffizienzmaßnahme zu Endenergieeinsparungen mehrerer Energieträger, entspricht das Endenergieeinsparpotenzial dieser Energieeffizienzmaßnahme der Summe des Endenergieeinsparpotenzials aller eingesparten Energieträger.

4.2 Heuristischer Optimierungsalgorithmus

Die Komplexitätstheorie ist ein Teilgebiet der Informatik und befasst sich mit der Klassifizierung von Problemen. Wegener (2003) beschreibt die Komplexitätstheorie wie folgt: „Das Ziel der Komplexitätstheorie ist es, für wichtige Probleme nachzuweisen, dass zu ihrer Lösung bestimmte Mindestressourcen nötig sind. Die Ergebnisse der Komplexitätstheorie haben konkrete Auswirkungen auf die Entwicklung von Algorithmen für praktische Anwendungen.“ Bei der Bewertung mehrerer interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen innerhalb eines Systems handelt es sich um ein kombinatorisches Optimierungsproblem mit binären Entscheidungsvariablen (0/1-Programmierung)³⁷ und einer $O(n!)$ -Laufzeit. Karp (1972) zeigte, dass diese Problemlart zu der Klasse $NP-C$ (NP -vollständig) gehört.³⁸ $NP-C$ zählen zu den schwierigsten

³⁶ An anderem Ort: Fußnote 16, S. 12.

³⁷ Es gibt binäre Entscheidungsvariablen. 0: Maßnahme wird nicht umgesetzt, 1: Maßnahme wird umgesetzt.

³⁸ Hypothese: $NP \neq P$. NP (für nichtdeterministisch polynomielle Zeit) ist eine der Komplexitätstheorie zuzuordnende Komplexitätsklasse. Probleme werden dabei entsprechend ihrer Komplexität (mit Blick auf die Lösbarkeit und die erforderlichen Laufzeiten) klassifiziert. Die Klasse P beschreibt alle Probleme, die mit einer deterministischen Rechenmaschine in Polynomialzeit lösbar sind. Die Rechenzeit nimmt – in Abhängigkeit der Problemgröße – maximal mit einer Polynomfunktion zu. Es gilt: $O(n^k)$. Die Klasse NP -vollständig beschreibt Probleme, die auf einer nichtdeterministischen Rechenmaschine in polynomieller Zeit lösbar sind. Wird die Hypothese $NP \neq P$ widerlegt, d. h., es wird nachgewiesen, dass $NP = P$ gilt, dann existieren für Probleme der Klasse NP effiziente Lösungsalgorithmen (Wegener 2003). Dies würde bedeuten, dass „[...]wir viele unserer Vorstellungen grundlegend revidieren [müssten]“ (Wegener 2003). Das $NP-P$ -Problem ist Teil der vom Clay Mathematics Institute (CMI) veröffentlichten Millennium-Probleme, deren Lösung mit einem Preisgeld von einer Million US-Dollar dotiert ist (CMI 2018).

Problemen und sind zum jetzigen Stand der Wissenschaft auf einer deterministischen Maschine (vermutlich) nicht effizient lösbar (Wegener 2003). Theoretisch führt die vollständige Enumeration (engl. *brute-force search*) zur Identifikation des optimalen Systems (Dempe und Schreier 2006). Dies ist aber nur für eine begrenzte Anzahl an Problemgrößen n praktikabel. Abbildung 4-4 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Anzahl der Problemgrößen und der Anzahl der Elementaroperationen.

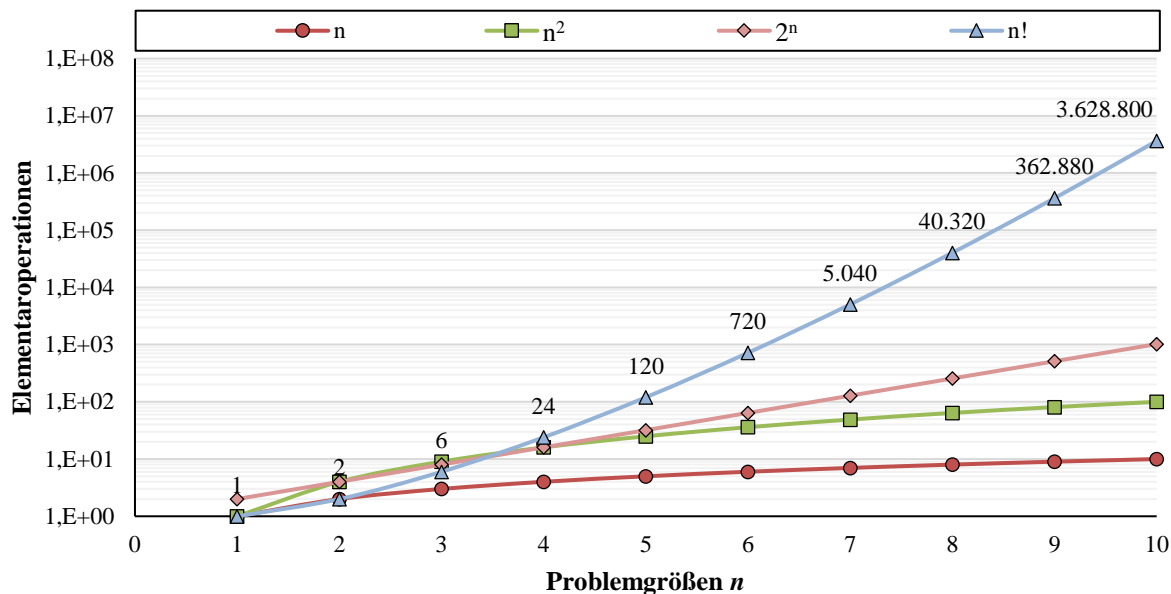


Abbildung 4-4: Anzahl der Elementaroperationen in Abhängigkeit der Problemgröße n (logarithmische Ordinate)

Steigt die Anzahl der Problemgrößen von $n = 5$ auf $n = 10$, führt dies zu einem Anstieg der Elementaroperationen von 120 auf 3.628.800 (ca. +3 Mio. %). Es besteht ein überexponentieller Zusammenhang zwischen der Anzahl der Problemgrößen und den Elementaroperationen. Bei Problemen mit exponentieller Rechenzeit führt auch ein signifikanter Anstieg der theoretischen Operationszahl nicht zu einer verbesserten Lösbarkeit (Dempe und Schreier 2006). „Damit wird deutlich, dass ein Algorithmus, dessen Rechenzeit exponentiell von der Problemgröße abhängt, praktisch nur für kleine Aufgaben anwendbar ist. [...] Die Konstruktion immer schnellerer Computer löst dieses Problem offenbar nicht.“ (Dempe und Schreier 2006). Daher wird im Rahmen dieser Arbeit eine Heuristik zur Identifikation der optimalen Maßnahmenauswahl entwickelt. Ziel der Heuristik ist die bestmögliche Annäherung an das optimale System durch eine vorzeitige Eliminierung der im Vergleich zum optimalen System unwirtschaftlichen Permutationen unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der Systemdekomposition sowie technischer und strategischer Überlegungen. Nachfolgend werden die fünf Schritte der Heuristik vorgestellt.

I. Systemdefinition und -dekomposition

Das Verbundsystem dient als Basis für die Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen. Folglich ist der erste Schritt die eindeutige Definition der Systemgrenzen des Verbundsystems. Gemäß VDI (2014) umfasst eine Energiebilanz für technische Systeme eine räumliche, stoffliche und zeitliche Abgrenzung (vgl. Abschnitt 2.2.2). Anschließend erfolgt, unter Berücksichtigung der Ausführungen in Abschnitt 4.1, die Systemdekomposition des Verbundsystems in die Verfahrensstufen Energienutzung und Energieversorgung sowie die weiteren Hierarchieebenen (Verfahrensschritt, Prozessgruppe, Prozessschritt). Die Systemdekomposition eines Verbundsystems erfolgt individuell in Abhängigkeit der Systemkomplexität sowie der Zielsetzung einer Untersuchung.

II. Zuordnung der Energieeffizienzmaßnahmen zu Prozessschritten/-gruppen

Im Anschluss an die Definition des Verbundsystems sowie der Dekomposition in seine Teilsysteme erfolgt die Zuordnung der Energieeffizienzmaßnahmen zu den Prozessschritten/-gruppen. Die Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme erfolgt durch Variation der technischen Daten eines Prozessschritts. Jedem Prozessschritt einer Prozessgruppe werden individuelle Energieeffizienzmaßnahmen, in Abhängigkeit des Anwendungspotenzials, zugeordnet.

III. Definition von Maßnahmenbündel innerhalb einer Prozessgruppe

Innerhalb jeder Prozessgruppe werden Maßnahmenbündel definiert. Ein Maßnahmenbündel umfasst alle sich aus technischen Gesichtspunkten nicht ausschließenden Energieeffizienzmaßnahmen. Wird beispielsweise in der Prozessgruppe Druckluftbereitstellung eine Gesamtmenge M von sieben Energieeffizienzmaßnahmen identifiziert, von denen sich zwei Energieeffizienzmaßnahmen aus technischen Gründen nicht kombinieren lassen, ergeben sich zwei Maßnahmenbündel M_A und M_B . Jedes Maßnahmenbündel besteht aus sechs Energieeffizienzmaßnahmen, darunter eine der zwei sich technisch ausschließenden Energieeffizienzmaßnahmen sowie die fünf verbleibenden Energieeffizienzmaßnahmen. Durch die Aufteilung der Energieeffizienzmaßnahmen in Maßnahmenbündel innerhalb einer Prozessgruppe werden alle Maßnahmenkombinationen ausgeschlossen, die sich aus technischen Gesichtspunkten nicht kombinieren lassen.

IV. Definition von Bewertungsebenen innerhalb der Maßnahmenbündel

Zur ganzheitlichen Bewertung technischer Systeme erfolgt die Optimierung vom Kernprozess beginnend entlang der Umwandlungsstufen der Energiebereitstellung (Hesselbach 2012). Beispielsweise ist ein vorzeitiger Austausch eines Elektromotors nicht sinnvoll, wenn nachträglich die benötigte Antriebsleistung reduziert und somit ein kleiner dimensionierter Elektromotor ausgewählt werden kann (Fleiter et al. 2009). Ebenso sollte keine Wärmerückgewinnung installiert werden, wenn nachträglich die nutzbare Abwärme reduziert werden kann. Auch ist es

aus ökologischen Gesichtspunkten fraglich, frühzeitig auf End-of-pipe-Technologien zu setzen (bspw. eine Wärmerückgewinnung), die von Ineffizienzen anderer Technologien profitieren. Entsprechend werden zur Spezifizierung der Optimierung technischer Systeme innerhalb der Maßnahmenbündel drei Bewertungsebenen definiert.³⁹ (1) Die erste Ebene ist die Reduktion des Nutzenergiebedarfs in Kombination mit der Auswahl eines geeigneten Steuerungs- oder Regelungskonzepts. (2) Im Anschluss folgt die Steigerung der Energieeffizienz zur Bereitstellung der Nutzenergie. Bei Prozessgruppen mit mehreren Prozessschritten und folglich mehreren Umwandlungsstufen erfolgt die Energieeffizienzsteigerung vom Nutz- zum Endenergiebedarf. (3) Die dritte Ebene stellt die Wärmerückgewinnung dar. Abbildung 4-5 verdeutlicht dies am Beispiel der Druckluftbereitstellung.

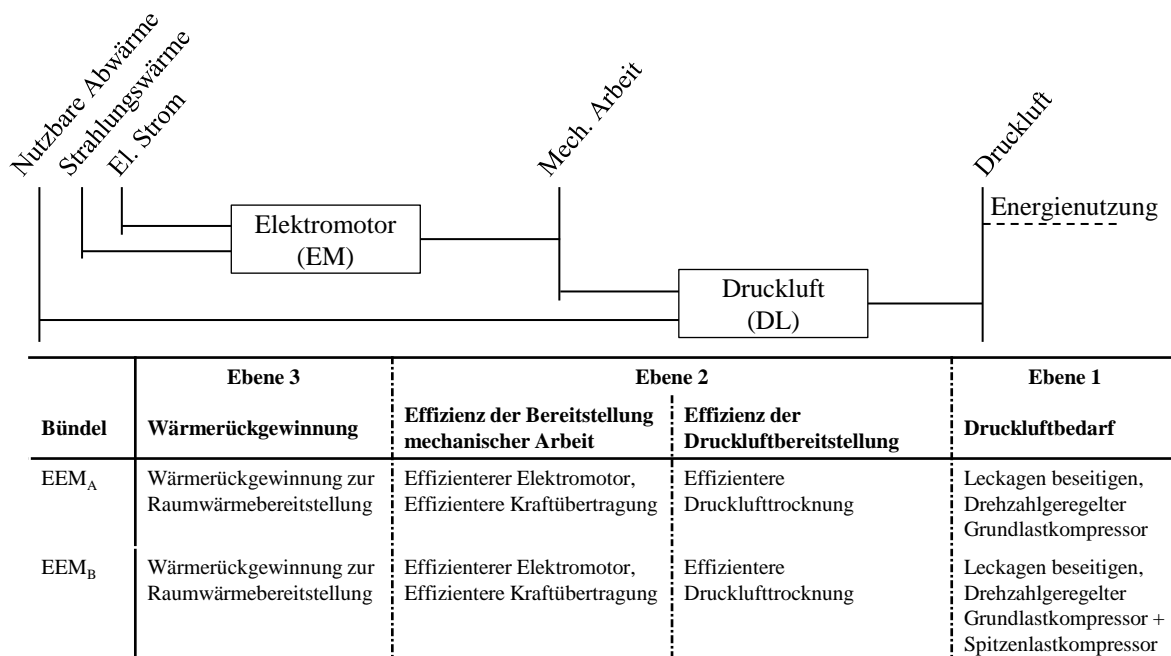


Abbildung 4-5: Zuordnung der Energieeffizienzmaßnahmen am Beispiel der Druckluftherzeugung

Die Prozessgruppe Druckluftherzeugung besteht aus den zwei Prozessschritten Druckluftbereitstellung und Elektromotor. Der Prozessgruppe sind die Maßnahmenbündel M_A und M_B mit je sechs Energieeffizienzmaßnahmen zugeordnet. Die erste Ebene der Maßnahmenbündel stellt die Reduktion des Druckluftbedarfs (bspw. durch die Beseitigung von Leckagen) und die Auswahl eines geeigneten Steuerungs- oder Regelungskonzepts (bspw. durch den Einsatz eines drehzahlgeregelten Grundlastkompressors in Kombination mit einem Spitzenlastkompressor im Regelbereich des Grundlastkompressors) dar. Anschließend erfolgt die Steigerung der Energieeffizienz entlang der Umwandlungsstufen vom Nutzenergiebedarf zum Endenergiebe-

³⁹ Ein vergleichbarer hierarchischer Ansatz existiert beispielsweise in der Abfallwirtschaft. Hier regelt die Abfallhierarchie den ressourcenschonenden Umgang mit Abfällen (Europäisches Parlament und Rat 2008).

darf. Dazu werden die Ebenen Energieeffizienz der Druckluftbereitstellung und Energieeffizienz der Bereitstellung mechanischer Arbeit unterschieden. Die letzte Ebene der Optimierung der Prozessgruppe beinhaltet Maßnahmen zur Nutzung der verbleibenden Abwärme (bspw. durch Wärmerückgewinnung zur Raumwärmebereitstellung). Durch die Aufgliederung der Energieeffizienzmaßnahmen innerhalb eines Maßnahmenbündels in mehrere Ebenen reduziert sich die Anzahl der Permutationen am Beispiel der Prozessgruppe Druckluftbereitstellung von 5.040 auf 12 (-99,76 %).⁴⁰ Die Aufteilung der Maßnahmenbündel in mehrere Ebenen definiert ausschließlich die Reihenfolge der Maßnahmenimplementierung; die Optimierung einer Prozessgruppe erfolgt integral, sodass die Wechselwirkungen zwischen Prozessschritten bei der Optimierung berücksichtigt werden.

V. Heuristische Optimierung

Im Anschluss an die Zuordnung der Energieeffizienzmaßnahmen zu Bewertungsebenen innerhalb eines Maßnahmenbündels folgt die heuristische Optimierung. Diese beruht auf einer partiellen Iteration der Maßnahmenpermutationen innerhalb eines Verbundsystems. Zielgröße der Heuristik ist – im Sinne der neoklassischen Theorie des ‚homo oeconomicus‘⁴¹ – die Ertragsmaximierung. Diese wird durch die Maximierung des Produkts aus spezifischen Energieeinsparungskosten und Endenergieeinsparung aller in einem Verbundsystem implementierten Energieeffizienzmaßnahmen definiert (i. A. a. Brunke 2017; Meier 1982). Dazu werden die mit der Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme verbundenen Gesamtkosten, d. h. die Kosten für Investition und Montage sowie die variablen Kosten durch Wartung und Instandhaltung und Kostenreduktionen durch Endenergieeinsparungen berücksichtigt. Die Formalismen zur ökonomischen Bewertung werden in Abschnitt 4.3 beschrieben. Abbildung 4-6 verdeutlicht die Heuristik zur Optimierung eines Verbundsystems anhand eines Schaubilds. Die Optimierung erfolgt entlang der Verfahrensstufen innerhalb eines Verbundsystems entgegen der physikalischen Energieflussrichtung. Analog zum Verbundsystem erfolgt die Optimierung innerhalb einer Verfahrensstufe entlang der Verfahrensschritte und entgegen der physikalischen Energieflussrichtung. Dadurch wird der Einfluss der Optimierung der Verfahrensschritte auf nachfolgende Verfahrensschritte berücksichtigt. Innerhalb eines Verfahrensschritts werden die einzelnen Prozessgruppen optimiert. Da zwischen den Prozessgruppen innerhalb eines Verfahrensschritts keine Relationen bestehen, werden diese sequenziell optimiert. Jede Prozessgruppe und die darin enthaltenen Prozessschritte werden wiederum durch die Berechnung aller Maßnahmenpermutationen unter Berücksichtigung der Maßnahmenbündel und unter Einbeziehung der

⁴⁰ Die theoretische Anzahl an Permutationen entspricht der Fakultät der Anzahl an Energieeffizienzmaßnahmen. Es gilt: $n_{\text{theo}} = 7! = 5.040$. Im Rahmen der heuristischen Optimierung werden zwei Maßnahmenbündel mit vier Ebenen und jeweils einer bzw. zwei Energieeffizienzmaßnahmen bewertet. Entsprechend ergibt sich für die Anzahl der zu berechnenden Permutationen: $n_{\text{heu}} = 2(2! + 1! + 2! + 1!) = 12$.

⁴¹ Das Modell des ‚homo oeconomicus‘ beschreibt in der neoklassischen Theorie einen rational agierenden Agenten, der das Ziel der Nutzenmaximierung verfolgt (Manstetten et al. 1998).

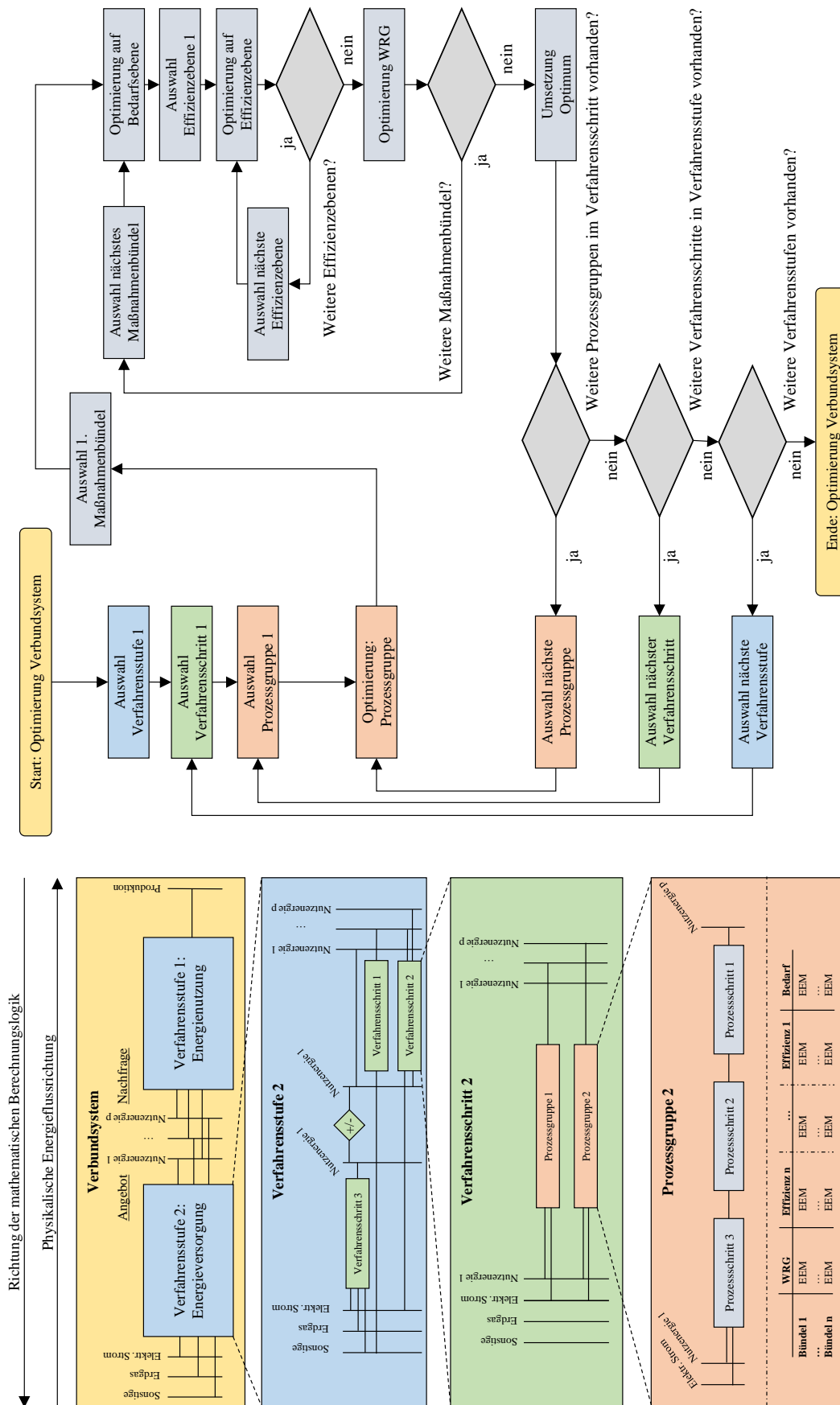


Abbildung 4-6: Schaubild des heuristischen Optimierungsalgorithmus

unterschiedlichen Ebenen innerhalb eines Maßnahmenbündels integral optimiert. Dazu werden alle Permutationen zur Reduktion des Bedarfs innerhalb eines Maßnahmenbündels ermittelt und die optimale Permutation ausgewählt. Analog wird für die einzelnen Ebenen zur Steigerung der Energieeffizienz vorgegangen. Abschließend erfolgt die Bewertung zur Ausnutzung der verbleibenden Abwärme. Diese Vorgehensweise wird für alle Maßnahmenbündel einer Prozessgruppe durchgeführt. Es wird das Maßnahmenbündel mit der optimalen Permutation umgesetzt. Durch die integrale Optimierung der Prozessgruppen werden die Interaktionen zwischen den Prozessschritten erfasst.

VI. Berechnung des technischen Energieeinsparpotenzials

In Abhängigkeit der Zielsetzung einer Untersuchung kann im Anschluss an die ökonomische Optimierung das verbleibende technische Energieeinsparpotenzial bestimmt werden. Dazu werden die bis dato noch nicht umgesetzten Energieeffizienzmaßnahmen umgesetzt. Die Umsetzung der Energieeffizienzmaßnahmen erfolgt dabei analog zur ökonomischen Optimierung entlang der Verfahrensschritte vom Nutzenergiebedarf zum Endenergiebedarf.

4.3 Ökonomische Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen

Die Berechnung der spezifischen Energieeinsparkosten im Sinne dieser Arbeit stellt eine Synthese bestehender Methoden dar (i. W. Brunke 2017; Beer et al. 2009; Worrell et al. 2003; Meier et al. 1983; Meier 1982). Aspekte dieser Untersuchungen werden zu einer alternativen Methode zur Berechnung der spezifischen Energieeinsparkosten zusammengeführt.

Berechnung der spezifischen Energieeinsparkosten

Zur Berechnung der spezifischen Energieeinsparkosten werden die mit der Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme einhergehenden Veränderungen der jährlichen Gesamtkosten durch das jährliche Endenergieeinsparpotenzial dividiert (Brunke 2017; Worrell et al. 2003). Da eine Energieeffizienzmaßnahme per definitionem mit einer Endenergieeinsparung verbunden ist (s. Abschnitt 2.1.1), werden die spezifischen Energieeinsparkosten ausschließlich für Energieeffizienzmaßnahmen berechnet, die zu einer Endenergieeinsparung führen. Ein wesentliches Differenzierungsmerkmal sind die mit der Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme verbundenen Veränderungen der jährlichen Gesamtkosten. Die Berechnung der spezifischen Energieeinsparkosten erfolgt zunächst individuell für jede Energieeffizienzmaßnahme an jeder Prozessgruppe eines Verbundsystems.

$$SEEK_{EEM_i,PG_j} = \frac{\Delta TOTEX_{EEM_i,PG_j}}{EEP_{EEM_i,PG_j}} \quad 4-2$$

unter der Nebenbedingung

$$EEP_{EEM_i,PG_j} > 0$$

mit

EEM_i	Energieeffizienzmaßnahme
PG_j	Prozessgruppe
$SEEK_{EEM_i,PG_j}$	Spezifische Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i an der Prozessgruppe PG_j [EUR/MWh]
$\Delta TOTEX_{EEM_i,PG_j}$	Veränderung der jährlichen Gesamtkosten der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i an der Prozessgruppe PG_j [EUR/a]
EEP_{EEM_i,PG_j}	Jährliche Endenergieeinsparung der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i an der Prozessgruppe PG_j [MWh/a]

Berechnung der jährlichen Gesamtkosten einer Energieeffizienzmaßnahme

Zur Berechnung der Barwerte zukünftiger Zahlungen werden die über den Betrachtungszeitraum anfallenden kapitalgebundenen und variablen Kosten auf den Startzeitpunkt des Betrachtungszeitraums diskontiert. Anschließend wird die Summe der Barwerte (Kapitalwert) durch Multiplikation mit dem Annuitätenfaktor in eine Annuität (konstante Zahlung innerhalb einer Periode) überführt. Diese entspricht der jährlichen Gesamtkostenänderung (s. Formel 4-3). Die monetäre Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen erfolgt „inflationbereinigt [...] mit realen Zinssätzen und Preissteigerungsraten [...]“ (Konstantin 2017).

$$\Delta TOTEX_{EEM_i,PG_j} = -AF_{EEM_i} * \left(\sum_{t=T^{START}}^{T_{EEM_i}^{END}} \frac{CAPEX_{EEM_i,PG_j,t} + \Delta OPEX_{EEM_i,PG_j,t}}{(1+d)^{t-T^{START}}} \right) \quad 4-3$$

mit

AF_{EEM_i}	Vorschüssiger Annuitätenfaktor der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i mit $AF_{EEM_i} \in \mathbb{R}^+$ [1/a]
$CAPEX_{EEM_i,PG_j,t}$	Kapitalgebundene Kosten im Jahr t durch die Umsetzung der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i an der Prozessgruppe PG_j [EUR]
$\Delta OPEX_{EEM_i,PG_j,t}$	Veränderung der variablen Kosten im Jahr t durch Umsetzung der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i an der Prozessgruppe PG_j [EUR]
d	Diskontierungsrate mit $d \in \mathbb{R}^+$ $\{0 \leq d \leq 1\}$ [-]
t	Jahr im Betrachtungszeitraum mit $t \in \mathbb{N} \{T^{START} \leq t \leq T_{EEM_i}^{END}\}$
T^{Start}	Startjahr des Betrachtungszeitraums mit $T^{START} \in \mathbb{N} \{T^{START} < T_{EEM_i}^{END}\}$
$T_{EEM_i}^{END}$	Endjahr des Betrachtungszeitraums der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i mit $T_{EEM_i}^{END} \in \mathbb{N} \{T_{EEM_i}^{END} > T^{START}\}$

Es wird von einer Endenergieeinsparung beginnend im Startjahr ausgegangen (Brunke 2017). Folglich ist zur Berechnung der jährlichen Gesamtkostenänderung der vorschüssige Annuitätenfaktor zu wählen (Röhrenbacher 2008) (s. Formel 4-4 und 4-5).

$$AF_{EEM_i} = \frac{(1+d)^T * d}{((1+d)^T - 1) * (1+d)} \quad 4-4$$

mit

$$T = T_{EEM_i}^{END} - T^{START} \quad 4-5$$

und

T Länge des Betrachtungszeitraums mit $T \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ [a]

Koomey et al. (1991) diskutieren unterschiedliche Vorgehensweise zur Definition des Betrachtungszeitraums. Ein vielfach genutzter Ansatz ist die Definition des Betrachtungszeitraums anhand der (technischen) Lebens- oder Nutzungsdauer einer Energieeffizienzmaßnahme (McKane und Hasanbeigi 2011; Hasanbeigi et al. 2010a; 2010b; Stoff 1995; Rosenfeld et al. 1993; Koomey et al. 1991). Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Definition des Betrachtungszeitraums die Nutzungsdauer einer Energieeffizienzmaßnahme gewählt. Dabei kann die Nutzungsdauer die (technische) Lebensdauer einer Energieeffizienzmaßnahme unterschreiten, da ein vorzeitiger Austausch einer Energieeffizienzmaßnahme aus technischen, wirtschaftlichen, rechtlichen oder sonstigen Gründen möglich ist (Bubeck 2017). Diesem Ansatz folgend ergibt sich das Ende des Betrachtungszeitraums gemäß Formel 4-6:

$$T_{EEM_i}^{END} = T^{START} + T_{EEM_i}^N \quad 4-6$$

mit

$T_{EEM_i}^N$ Nutzungsdauer der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i mit $T_{EEM_i}^N \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ [a]

Die Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme ist mit Ausgaben für die Anschaffung sowie für die Montage selbiger verbunden. Diese Ausgaben fallen zum Startzeitpunkt des Betrachtungszeitraums an (s. Formel 4-7):

$$CAPEX_{EEM_i,PG_j,t} = \begin{cases} -I_{EEM_i,PG_j} - M_{EEM_i,PG_j} & \text{für } t = T^{START} \\ 0 & \text{für } t \neq T^{START} \end{cases} \quad 4-7$$

mit

I_{EEM_i,PG_j} Ausgaben für die Beschaffung der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i an der Prozessgruppe PG_j im Jahr T^{START} [EUR]

M_{EEM_i,PG_j} Ausgaben für die Montage der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i an der Prozessgruppe PG_j im Jahr T^{START} [EUR]

Nach VDI (2012) wird zur Berechnung der variablen Kosten zwischen verbrauchsgebundenen und betriebsgebundenen Kosten differenziert. Im Sinne dieser Arbeit umfassen die verbrauchsgebundenen Kosten die Veränderungen der Energiekosten (inkl. CO₂-Zertifikate), während die betriebsgebundenen Kosten die Veränderungen der Kosten für Betriebs- und Wartungsarbeiten beinhalten (s. Formel 4-8). Die Berücksichtigung der Zertifikatskosten ist vornehmlich bei Analysen in den energieintensiven Branchen relevant (Brunke 2017).

$$\Delta OPEX_{EEM_i, PG_j, t} = \sum_{e \in \tilde{E}} \left(EEP_{EEM_i, PG_j, e} * (p_{e,t} + f_{CO_2, e} * p_{CO_2, t} * a) \right) + \Delta OaM_{EEM_i, PG_j, t} \quad 4-8$$

mit

$p_{e,t}$	Preis des Endenergieträgers e zum Zeitpunkt t [EUR/MWh]
$p_{CO_2, t}$	Preis der CO ₂ -Zertifikate zum Zeitpunkt t [EUR/ t_{CO_2}]
$EEP_{EEM_i, PG_j, e}$	Jährliche Endenergieeinsparung durch Umsetzung der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i an der Prozessgruppe PG_j vom Energieträger e [MWh/a]
$\Delta OaM_{EEM_i, PG_j, t}$	Veränderung der Betriebskosten zum Zeitpunkt t der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i an der Prozessgruppe PG_j [EUR/MWh]
a	Binäre Variable mit $a = \begin{cases} 1 & \text{nimmt am CO}_2\text{-Zertifikatehandel teil} \\ 0 & \text{nimmt nicht am CO}_2\text{-Zertifikatehandel teil} \end{cases}$
$f_{CO_2, e}$	CO ₂ -Emissionsfaktor des Endenergieträgers e [t_{CO_2} /MWh]
e	Endenergieträger

und den Mengen

\tilde{E} Alle betrachteten Endenergieträger

Aggregation der spezifischen Energieeinsparkosten

In Abhängigkeit der Anzahl der betrachteten Energieeffizienzmaßnahmen ist zur besseren Visualisierung in einer Energieeinsparkostenkurve eine Aggregation identischer Energieeffizienzmaßnahmen erforderlich. Dazu werden die mit den Endenergieeinsparungen gewichteten Mittelwerte aller Energieeffizienzmaßnahmen eines Typs (bspw. der Einsatz effizienterer Elektromotoren) mit positiven bzw. negativen spezifischen Energieeinsparkosten bestimmt (s. Formel 4-9). Würden alle Energieeffizienzmaßnahmen eines Typs mit positiven und negativen spezifischen Energieeinsparkosten zu einer Energieeffizienzmaßnahme aggregiert, entspräche der Schnittpunkt einer Energieeffizienzmaßnahme mit der Abszisse in einer Energieeinsparkostenkurve nicht dem tatsächlichen wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzial. Somit wird durch die differenzierte Aggregation eine Verzerrung der Ergebnisse in der Energieeinsparkostenkurve verhindert. Dies wird nachfolgend am Beispiel der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten dargelegt. Die Berechnung für Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten erfolgt analog.

$$\overline{SEEK}_{EEM_i} = \begin{cases} \overline{SEEK}_{EEM_i}^{POS} & \text{für } EEM_i \text{ mit pos. SEEK} \\ \overline{SEEK}_{EEM_i}^{NEG} & \text{für } EEM_i \text{ mit neg. SEEK} \end{cases} \quad 4-9$$

mit

\overline{SEEK}_{EEM_i}	Gewichteter Mittelwert der spez. Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i [EUR/MWh]
$\overline{SEEK}_{EEM_i}^{POS}$	Gewichteter Mittelwert der spez. Energieeinsparkosten aller Energieeffizienzmaßnahmen EEM_i mit positiven spez. Energieeinsparkosten [EUR/MWh]
$\overline{SEEK}_{EEM_i}^{NEG}$	Gewichteter Mittelwert der spez. Energieeinsparkosten aller Energieeffizienzmaßnahmen EEM_i mit negativen spez. Energieeinsparkosten [EUR/MWh]

Zur Bestimmung der spezifischen Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten wird das Endenergieeinsparpotenzial entsprechender Energieeffizienzmaßnahmen summiert (s. Formel 4-10).

$$EEP_{EEM_i}^{POS} = \sum_{PG_j} EEP_{EEM_i,PG_j}^{POS}, \forall PG_j \in \tilde{E}^{P-VS} \quad 4-10$$

unter der Nebenbedingung

$$EEP_{EEM_i,PG_j}^{POS} > 0$$

mit

$EEP_{EEM_i}^{POS}$	Kumuliertes Endenergieeinsparpotenzial aller Energieeffizienzmaßnahmen EEM_i mit positiven spez. Energieeinsparkosten [MWh/a]
EEP_{EEM_i,PG_j}^{POS}	Endenergieeinsparpotenzial der Energieeffizienzmaßnahme EEM_i an der Prozessgruppe PG_j mit positiven spez. Energieeinsparkosten [MWh/a]

und den Mengen

\tilde{E}^{P-VS}	Alle Prozessgruppen im Verbundsystem
--------------------	--------------------------------------

Im Anschluss an die Berechnung des kumulierten Endenergieeinsparpotenzials erfolgt die Berechnung der gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten (s. Formel 4-11).

$$\overline{SEEK}_{EEM_i}^{POS} = \frac{1}{EEP_{EEM_i}^{POS}} * \sum_{PG_j} EEP_{EEM_i,PG_j}^{POS} * SEEK_{EEM_i,PG_j}^{POS}, \forall PG_j \in \tilde{E}^{P-VS} \quad 4-11$$

unter der Nebenbedingung

$$EEP_{EEM_i,PG_j}^{POS} > 0$$

5 Konzeption des Energienachfragemodells

Der Einfluss von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen bei der Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen wird in der vorliegenden Arbeit mithilfe eines Modellansatzes bewertet. Dazu wird ein deterministisches, technologieorientiertes Bottom-up-Energienachfragemodell mit modular-hierarchischer Struktur, nicht linearer Programmierung und einem heuristischen Optimierungsansatz entwickelt (basierend auf den in Kapitel 4 beschriebenen methodischen Weiterentwicklungen). Die Implementierung des Energienachfragemodells erfolgt in MATLAB. Der Schwerpunkt liegt auf der Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen für Querschnittstechnologien (z. B. Einsatz eines effizienteren Elektromotors) sowie Energieeffizienzmaßnahmen mit Querschnittscharakter (z. B. Dämmung der Gebäudehülle). Es erfolgt eine dreigeteilte Modellbeschreibung. Zunächst werden in Abschnitt 5.1 die bestehenden Wirkzusammenhänge (Modelltopologie) beschrieben. Im folgenden Abschnitt 5.2 sind wesentliche mathematische Modellspezifikationen dokumentiert. Abschließend erfolgt in Abschnitt 5.3 eine Dokumentation der verwendeten Daten zur Modellparametrierung. Aufbauend auf der dreigeteilten Modellbeschreibung erfolgt in Abschnitt 5.4 eine Plausibilisierung des entwickelten Energienachfragemodells sowohl mit Blick auf die Technologiemonitoring als auch im Hinblick auf das entwickelte Verfahren zur integrierten Bewertung (s. Kapitel 4) im Vergleich zu den bisherigen Bewertungsalgorithmen (vgl. Ziel II, Abschnitt 1.2). Das Energienachfragemodell wird auch zur Durchführung der Potenzialanalyse für Querschnittstechnologien am Beispiel der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland eingesetzt (s. Kapitel 6).

5.1 Modelltopologie

Die Beschreibung der Modelltopologie umfasst die Abbildung einer Industriebranche in Form charakteristischer Typbetriebe, die Darstellung dieser in generischen Referenzenergiesystemen (RES) sowie die Auswahl einer geeigneten zeitlichen Auflösung.

5.1.1 Typbetrieb-Ansatz

Gemäß der in Kapitel 4 entwickelten Methodik erfordert die Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen eine technologiespezifische Analyse der Energieeinsparpotenziale. Eine örtlich hochaufgelöste Standortanalyse ist aufgrund der mittelständischen Struktur vieler Industriebranchen in Deutschland unter Ressourcengesichtspunkten nicht praktikabel. Im Jahr 2015 sind in Deutschland beispielsweise 5.258 Betriebe in der Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln (WZ 10) und 6.169 Betriebe im Maschinenbau (WZ 28) tätig (Statistisches Bundesamt 2017a). Eine Möglichkeit zur Reduktion des Ressourcenaufwands ist die Definition charakteristischer Typbetriebe für unterschiedliche Produktgruppen. Abbildung 5-1 zeigt die

aggregierte RES-Darstellung des Energienachfragemodells. Ein Typbetrieb stellt ein Verbundsystem im Sinne der in Abschnitt 4.1 dargelegten Konventionen dar. Zwischen den Typbetrieben bestehen somit keine funktionalen Zusammenhänge.

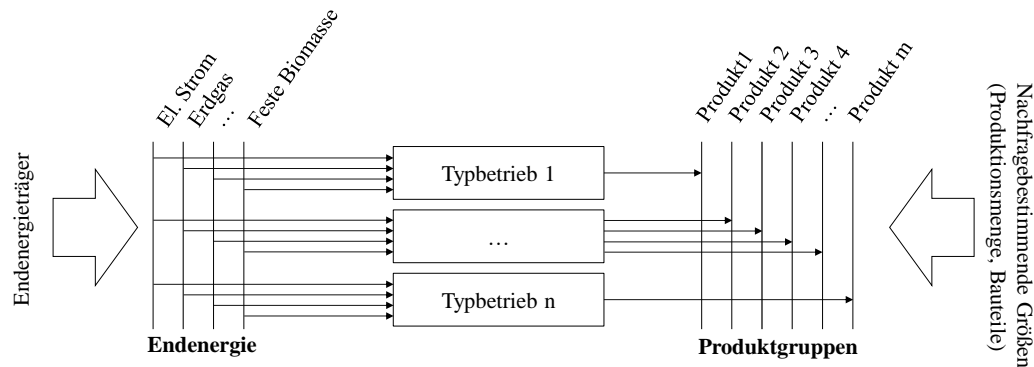


Abbildung 5-1: Aggregierte RES-Darstellung des Energienachfragemodells

Abbildung 5-2 zeigt das generisches Referenzenergiesystem (RES) eines Typbetriebs unter Berücksichtigung der modular-hierarchischen Modellstruktur. Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 4.1 stellt ein Typbetrieb ein Verbundsystem dar, das in die Verfahrensstufen der Energienutzung sowie der Energieversorgung disaggregiert wird. Zur Deckung einer exogenen Produktnachfrage ist die Produktion im Typbetrieb erforderlich. Dies induziert eine Nachfrage nach dem Produktionsbetrieb zur Herstellung des nachgefragten Produkts sowie der zur Produktion erforderlichen Gebäudeinfrastruktur. Die Produktion variiert produktspezifisch. Sowohl die Produktion als auch die Infrastruktur induzieren eine Nachfrage nach Nutzenergie, die durch die Energieversorgung gedeckt wird. In Abhängigkeit der Produktnachfrage werden endogene synthetische Lastprofile der Nutzenergie für eine Jahresperiode berechnet. Die Wahl der Zeitsegmente innerhalb einer Jahresperiode erfolgt prozessspezifisch. Die Vorgehensweise wird in Abschnitt 5.1.2 näher beschrieben. Die Energieversorgung wird wiederum in die Verfahrensschritte Produktionsversorgung I, Produktionsversorgung II, Infrastrukturbeleuchtung und Infrastrukturversorgung unterteilt. Produktionsversorgung I beinhaltet die Prozessgruppen zur Bereitstellung von Nutzenergie für die Produktion exklusive Prozesskälte. Die Prozesskälteversorgung ist wiederum in der Produktionsversorgung II enthalten. Hintergrund ist der (möglicherweise anfallende) Kältebedarf von Prozessgruppen der Produktionsversorgung I. Der Verfahrensschritt Infrastrukturbeleuchtung umfasst die Prozessgruppe Beleuchtung und der Verfahrensschritt Infrastrukturversorgung die Prozessgruppen zur Bereitstellung von Raumwärme und Klimakälte durch Teilklimaanlagen. Durch die modulare Modellstruktur kann ein Prozessschritt (bspw. Motor) in beliebig vielen Prozessgruppen verwendet werden. Die Produktionsversorgung I und II sowie die Infrastrukturbeleuchtung sind durch die Flüsse ‚Strahlungswärme‘ und ‚nutzbare Abwärme‘ mit der Infrastrukturversorgung verbunden (gelbe Linien). Dadurch werden der durch den Betrieb der Produktion sowie durch die Beleuchtung induzierte Wärmeeintrag in die Infrastruktur sowie der damit einhergehende veränderbare

Heiz- bzw. Klimatisierungsbedarf berücksichtigt. Ebenso wird (falls vorhanden) die nutzbare Abwärme aus Kälte- und Druckluftanlagen zur Bereitstellung von Raumwärme in der Gebäudeinfrastruktur berücksichtigt. Zur Deckung der Produktnachfrage sowie der dadurch induzierten Nachfrage nach Nutzenergie wird Endenergie vom Markt zu definierten Preisen bezogen. Die Topologie⁴² unterschiedlicher Typbetriebe unterscheidet sich durch die produktspezifischen Produktionsprozesse. Die Topologie der Energieversorgung sowie der Gebäudeinfrastruktur bleibt übergreifend für alle Typbetriebe identisch.

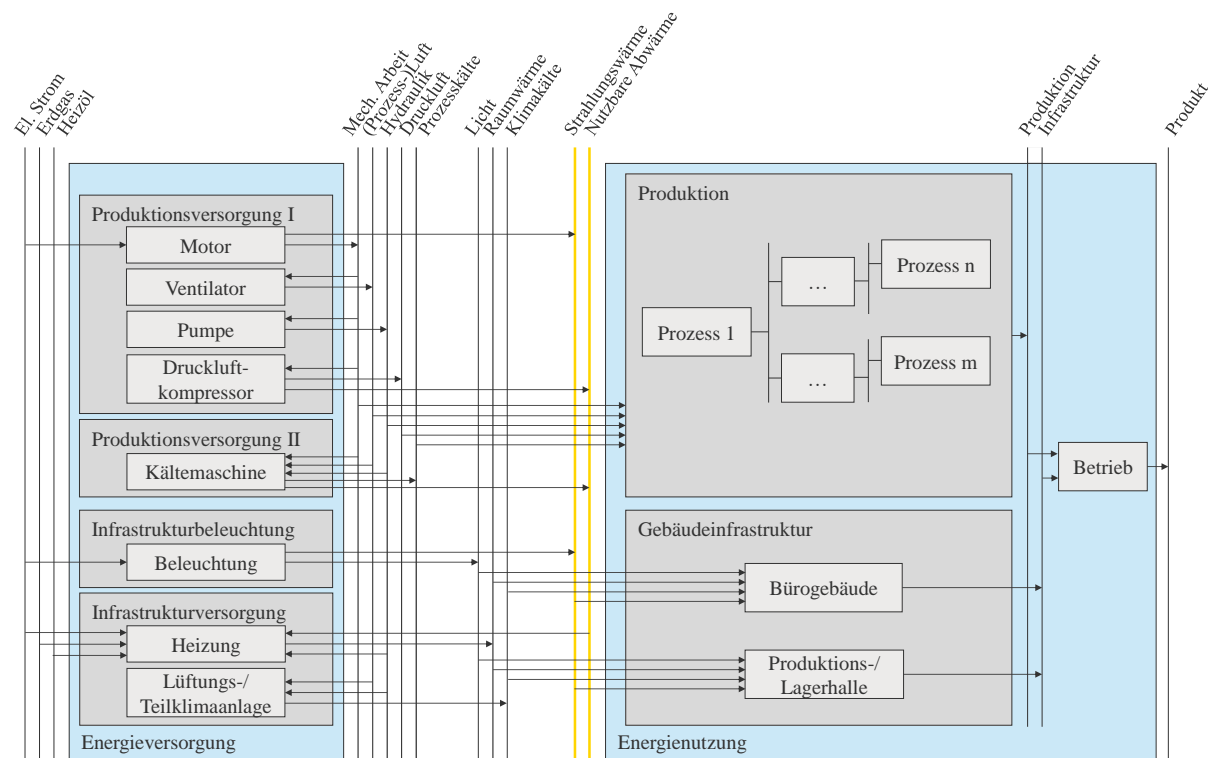


Abbildung 5-2: Generische RES-Darstellung eines Typbetriebs

5.1.2 Zeitliche Auflösung

Bei der modellgestützten Analyse komplexer Systeme stellt die Auswahl einer im Sinne der jeweiligen Untersuchung geeigneten zeitlichen Auflösung einen Kompromiss zwischen Ressourcenaufwand und Ergebnisgüte dar. Übertragen auf die Bewertung industrieller Energiesysteme sind dahingehend mehrere Aspekte zu berücksichtigen. So unterliegt der Energiebedarf diverser Prozesse, bspw. der Heizung und Klimatisierung, saisonalen Schwankungen. Des Weiteren beeinflussen die Arbeits- und Ruhetage der Produktion den Energiebedarf. Ferner lassen sich (quasi-)kontinuierliche sowie diskontinuierliche Prozesse unterscheiden. Beispielsweise ist der Betrieb einer Spritzgussanlage ein diskontinuierlicher Prozess mit Schwankungen

⁴² Die Topologie beschreibt ausschließlich die Wirkzusammenhänge innerhalb eines Verbundsystems. Jeder Typbetrieb verfügt über eine individuelle Technologieparametrisierung.

im Sekunden- bis Minutenbereich. Demgegenüber unterliegt der Betrieb von Extrusionsanlagen vergleichsweise geringen zeitlichen Schwankungen. Aufgrund dieser heterogenen Ausgangssituation existiert offensichtlich nicht die eine optimale zeitliche Auflösung für alle Prozessschritte/-gruppen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein hybrider Ansatz mit prozessspezifischer zeitlicher Auflösung gewählt (s. Abbildung 5-3). Zur Berücksichtigung saisonaler Effekte sowie der Unterschiede zwischen Arbeits- und Ruhetagen erfolgt für temperaturabhängige Prozesse die Aufteilung einer Jahresperiode in 8.760 stündliche Zeitsegmente. Im Gegensatz dazu werden (weitestgehend) temperaturunabhängige Prozesse zu zwei Typtagen (Arbeits- und Ruhetag) aggregiert. Hier erfolgt eine weitere Differenzierung. Bei stark volatilen Verbrauchern mit großen Lastgradienten und -amplituden erfolgt eine Aufteilung der Typtage in wahlweise 86.400 sekundliche Zeitsegmente oder 1.440 minütliche Zeitsegmente. Temperaturunabhängige Prozesse mit kontinuierlichem Verbrauch werden in 24 stündliche Zeitsegmente aufgeteilt. Die mathematischen Spezifikationen zur Verbindung zwischen Prozessen unterschiedlicher zeitlicher Auflösungen (bspw. durch Strahlungswärme) werden in Abschnitt 5.2.3 vorgestellt.

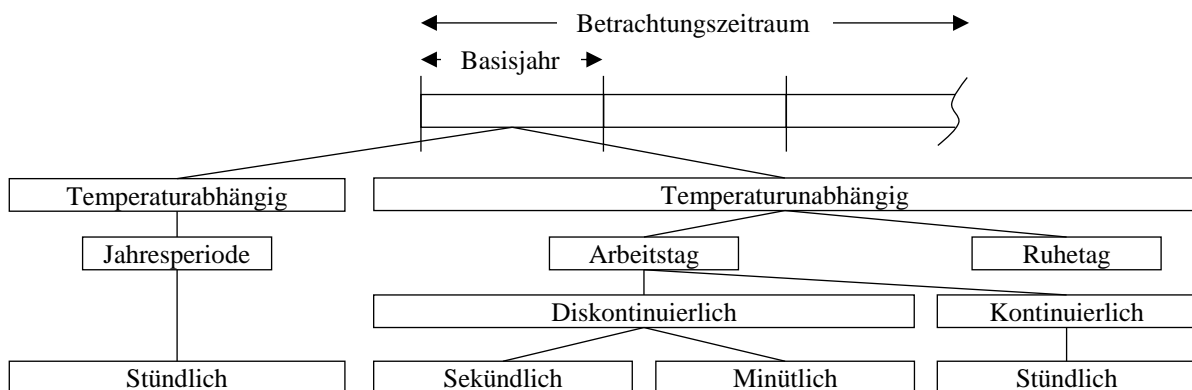


Abbildung 5-3: Zeitliche Auflösung des Basisjahres

5.2 Mathematische Spezifikationen

Die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen sowie des dynamischen Systemverhaltens, bspw. in Form von Teillastverhalten, wird durch eine detaillierte Technologiemonitoring, gepaart mit einer technologiespezifischen zeitlichen Auflösung, ermöglicht. In den Abschnitten 5.2.1 und 5.2.2 erfolgen die Beschreibung der Herleitung synthetischer Lastprofile der Energienachfrage sowie die Beschreibung der Modellierung der Energieversorgung. Anschließend wird in Abschnitt 5.2.3 die Kopplung der Energienutzung und -versorgung durch die Strahlungswärme sowie die verfügbare Abwärme beschrieben.

5.2.1 Herleitung synthetischer Lastprofile der Energienachfrage

Die Verfahrensstufen der Energienutzung stellen einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Nachfrage nach einem Produkt und dem Nutzenergiebedarf her. Der Nutzenergiebedarf wird wiederum durch die Verfahrensstufen der Energieversorgung gedeckt. Abbildung 5-4 zeigt schematisch den vierstufigen Prozess zur Berechnung der synthetischen Lastprofile. Nachfolgend werden die einzelnen Schritte dargestellt.

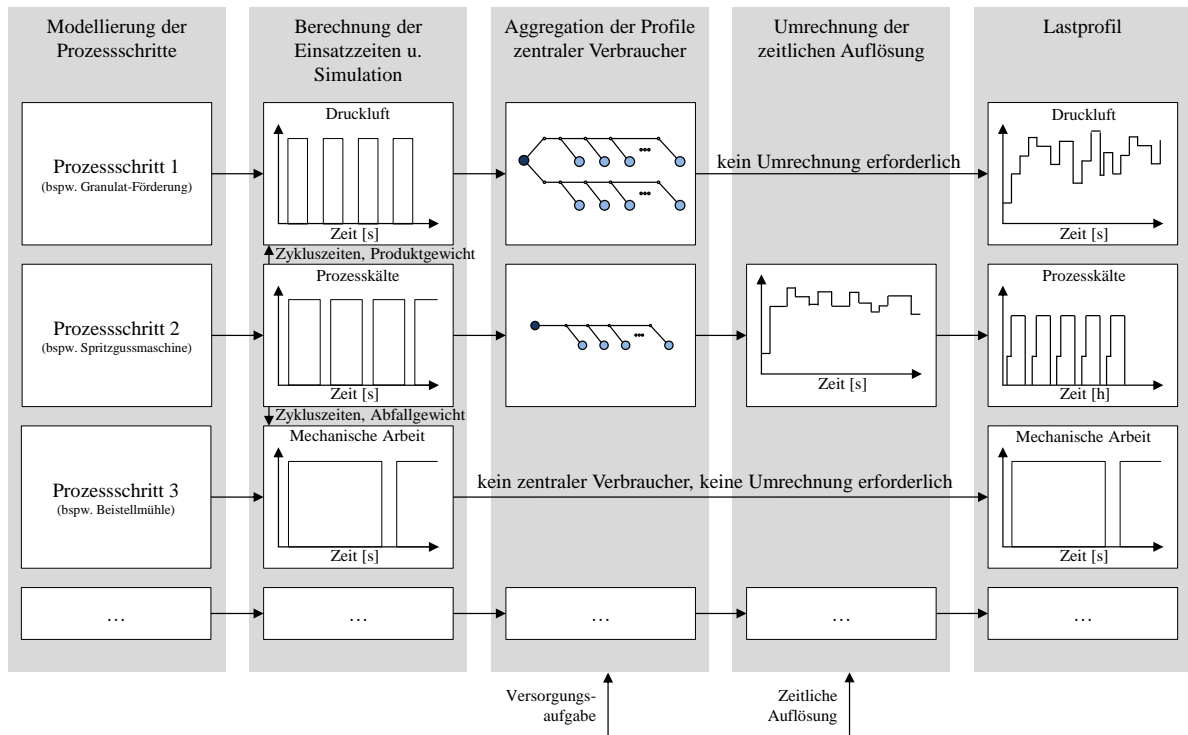


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise zur Herleitung synthetischer Lastprofile, eigene Abbildung in Anlehnung an Zeilinger und Einfalt (2012)

Modellierung der Prozessschritte

Den ersten Schritt bei der Berechnung der synthetischen Lastprofile des Nutzenergiebedarfs stellt die Modellierung der Prozessschritte dar. Die Modellierung erfolgt mittels Greybox-Ansatz, d. h. es werden sowohl kausale als auch empirische Modellrelationen verwendet (s. Abschnitt 2.2.3). Das Nachfrageprofil eines Prozessschritts wird durch unterschiedliche Last- bzw. Betriebszustände (u. a. außer Betrieb und Vollast) beschrieben. Die Herleitung des (synthetischen) Nutzenergiebedarfs für die unterschiedlichen Last- bzw. Betriebszustände eines

Prozessschritts erfolgt in Abhängigkeit der Datenverfügbarkeit sowie der energetischen Relevanz des jeweiligen Prozessschritts. Dazu wird wahlweise die kennzahlenbasierte⁴³ oder die physikalische⁴⁴ Modellierung eingesetzt. Anschließend werden die modellierten Prozessschritte der Energienutzung durch Parametervariationen plausibilisiert. Dazu wird ein Vergleich mit in der Literatur konstatierten Kennzahlen zum spezifischen Nutz- und Endenergieverbrauch, mit Herstellerangaben sowie mit konkreten Fallstudien durchgeführt, um mögliche Implementierungsfehler (u. a. Syntax-⁴⁵ und Semantikfehler⁴⁶) zu identifiziert und anschließend zu beheben.

Berechnung der Einsatzzeit und Simulation

Die Berechnung der Einsatzzeit eines Prozessschritts sowie die Simulation zur Berechnung des Nutzenergiebedarfs erfolgen in Abhängigkeit der zeitlichen Auflösung (s. Abschnitt 5.1.2) sowie des Schichtmodells eines Typbetriebs. Ausgangspunkt für die Berechnung der Einsatzzeiten der Prozessschritte ist der Kernprozess der Produktion (beispielsweise die Spritzgussmaschinen eines kunststoffverarbeitenden Betriebs). In Abhängigkeit der Zykluszeiten, des Maschinendurchsatzes des Kernprozesses sowie des bei der Produktion entstehenden Abfalls (im Falle der kunststoffverarbeitenden Industrie bspw. die Angüsse der Spritzgussanlagen oder die beim Extrusionsblasformen entstehenden Bautzen) werden wiederum die Einsatzzeiten der Prozessperipherie, beispielsweise der Granulatförderung sowie der im innerbetrieblichen Recycling eingesetzten Beistellmühlen, berechnet.

Aggregation der Lastprofile zentraler Verbraucher

Einige der Versorgungsaufgaben werden durch zentrale Versorger übernommen. So kann beispielsweise der Kältebedarf unterschiedlicher Anlagen mit identischem Temperaturbedarf durch eine zentrale Kältemaschine gedeckt werden. Gleichermäßen erfolgt typischerweise die Versorgung unterschiedlicher Druckluftanwendungen aus einem zentralen Druckluftnetz.

⁴³ Beispielsweise wird die erforderliche mechanische Arbeit zum Betrieb der im Kunststoffrecycling eingesetzten Mischanlagen kennzahlenbasiert berechnet. Die Herleitung der Kennzahlen erfolgt mittels Literatursichtung. So charakterisiert u. a. Johannaber (2004) den Durchsatz sowie die Leistungsdichte unterschiedlicher Mischwerkzeuge.

⁴⁴ Beispielsweise wird der Nutzenergiebedarf (u. a. mechanische Arbeit, Prozesskälte) einer Spritzgussmaschine weitestgehend auf Basis eines physikalischen Modells berechnet. So erfolgt die Berechnung des Nutzenergiebedarfs sowie der Zykluszeiten von Spritzgussmaschinen auf Basis thermodynamischer Grundlagen, ergänzt um empirisch hergeleitete Näherungsfunktionen (s. Hopmann und Michaeli 2015; Madan et al. 2015; 2013; Vlachopoulos und Strutt 2003; Liang et al. 2002; Mattis et al. 1996).

⁴⁵ Syntaxfehler: Fehler im Modellcode, bspw. auf Grund von Schreibfehlern (Dörn 2016).

⁴⁶ Semantikfehler: Fehler im Modellcode, bspw. auf Grund von Fehlern in der Programmlogik (Dörn 2016).

Wird der Nutzenergiebedarf mehrerer Verbraucher durch zentrale Anlagen versorgt, so entspricht das synthetische Lastprofil der Summe der Einzelprofile. Handelt es sich nicht um einen zentralen Versorger, ist keine Aggregation der Lastprofile erforderlich.

Umrechnung der zeitlichen Auflösung

Die Auswahl einer prozessspezifischen zeitlichen Auflösung erfolgt unter Berücksichtigung möglicher saisonaler Schwankungen, der Arbeits- und Ruhetage sowie der Kontinuität eines Prozessschritts (vgl. Abschnitt 5.1.2). Für ausgewählte Verbraucher ist es erforderlich, die zunächst sekundlich oder minütlich vorliegenden Lastprofile eines Arbeitstags in 8.760 stündliche Zeitsegmente einer Jahresperiode zu überführen. Dazu werden zunächst die sekundlichen bzw. minütlichen Zeitsegmente zu 24 stündlichen Zeitsegmenten eines Arbeitstags aggregiert. Anschließend erfolgt eine Allokation der Typtage (Arbeits- und Ruhetage) mit 24 stündlichen Zeitsegmenten entsprechend den unternehmensspezifischen Produktionsplänen zu einem Wochenprofil mit 168 stündlichen Zeitsegmenten und anschließend zu einer Jahresperiode mit 8.760 stündlichen Zeitsegmenten (s. Abbildung 5-5).

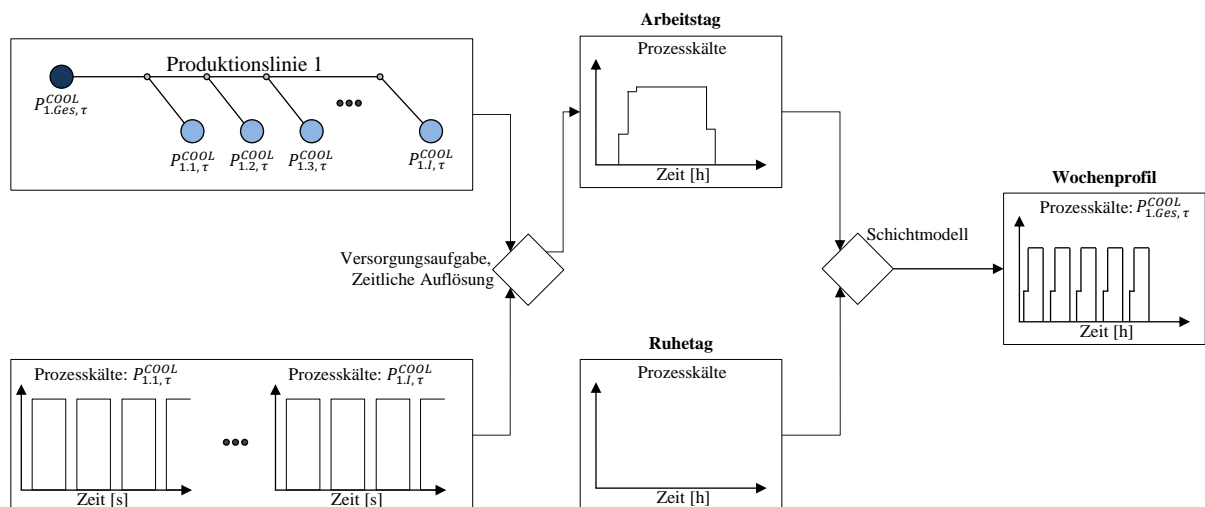


Abbildung 5-5: Schematische Darstellung zur Aggregation der Lastprofile zentraler Verbraucher sowie zur Umrechnung der zeitlichen Auflösung, mit P_{τ}^{COOL} : Kältebedarf im Simulationsschritt τ

5.2.2 Modellierung der Energieversorgung

Die Energieversorgung umfasst die Querschnittstechnologien (s. Abschnitt 2.1.2) zur Bereitstellung von Nutzenergie für die Energienutzung. Die Charakterisierung der Querschnittstechnologien erfolgt über generische Technologiekenlinien. Diese ermöglichen die Berücksichtigung des Technologieverhaltens im Teillastbereich sowie die Berücksichtigung unterschiedlicher Regelungskonzepte. In Abhängigkeit der Technologiekenlinien sowie der Regelungskonzepte erfolgt eine endogene Berechnung des Technologiewirkungsgrads. Dies wird nach-

folgend am Beispiel einer drosselgeregelten Kreiselpumpe veranschaulicht.⁴⁷ Für weiterführende Informationen zur Funktion der Querschnittstechnologien wird auf relevante Fachliteratur⁴⁸ verwiesen.

Technologiekennlinien

Die wesentlichen energieverbrauchsrelevanten Determinanten einer Kreiselpumpe sind der Volumenstrom sowie die Förderhöhe. Formel 5-1 beschreibt die hydraulische Leistung einer Kreiselpumpe als Produkt selbiger. Der pumpenspezifische Zusammenhang zwischen Förderhöhe und Volumenstrom wird durch die Pumpenkennlinie beschrieben. Im Schnittpunkt aus Pumpen- und Anlagenkennlinie (oder auch Rohrnetzkenlinie genannt) stellt sich der Betriebspunkt ein (s. Abbildung 5-6, S. 72).

$$P_{\tau}^{PU} = \frac{\rho * g * x_{\tau}^H * H^{BP} * x_{\tau}^Q * Q^{BP}}{1000}, \forall \tau \in \Theta \quad 5-1$$

mit

τ	Simulationsschritt
P_{τ}^{PU}	Hydraulische Leistung der Pumpe im Simulationsschritt τ [kW _{Hydr}]
ρ	Dichte des Fördermediums [kg/m ³]
g	Gewichtskraft [m/s ²]
x_{τ}^H	Relative Förderhöhe der Pumpe im Simulationsschritt τ [-]
H^{BP}	Förderhöhe der Pumpe im Nennbetriebspunkt [m]
x_{τ}^Q	Relativer Volumenstrom der Pumpe im Simulationsschritt τ [-]
Q^{BP}	Volumenstrom der Pumpe im Nennbetriebspunkt [m ³ /s]

und den Mengen

Θ	Simulationsschritte im Betrachtungszeitraum
----------	---

Für Kreiselpumpen wird eine generische Pumpenkennlinie hergeleitet (s. Formel 5-2). Dieser pumpenspezifische Zusammenhang zwischen dem relativen Volumenstrom (bezogen auf den Volumenstrom im Nennbetriebspunkt) sowie der relativen Förderhöhe (bezogen auf die Förderhöhe im Nennbetriebspunkt) ermöglicht eine größenspezifische Kalibrierung der Pumpenkennlinie (gemessen am Nennvolumenstrom Q^{BP}). Die relative Förderhöhe wird im Nennbetriebspunkt auf den Wert eins normiert (Nenner der Formel 5-2). Die Faktoren der generische Pumpenkennlinie (b_1 bis b_5) variieren dabei in Abhängigkeit des Pumpentyps.

⁴⁷ Eine vollständige Modelldokumentation ist aufgrund der Länge (Lines of Code (LOC) >> 10.000 Zeilen) nicht praktikabel.

⁴⁸ Elektromotoren: Binder (2012); Ventilatoren: Grundmann und Schönholtz (1999); Pumpen: Gebhardt et al. (2008), Menny (2006); Druckluftbereitstellung: Ruppelt (2003); Prozess- und Klimakälte/Heizung: Recknagel et al. (2007); Beleuchtung: van Tichelen et al. (2017), Kubiak et al. (2015).

$$x_{\tau}^H = \frac{b_1 + b_2 * x_{\tau}^Q + b_3 * Q^{BP} + b_4 * (x_{\tau}^Q)^2 + b_5 * x_{\tau}^Q * Q^{BP}}{b_1 + b_2 * 1 + b_3 * Q^{BP} + b_4 * 1^2 + b_5 * 1 * Q^{BP}}, \forall \tau \in \Theta \quad 5-2$$

mit

b_1 bis b_5 Faktoren der generischen Pumpenkennlinie

Regelungskonzepte

Der im Betrieb gelieferte Volumenstrom respektive die Förderhöhe und somit die hydraulische Leistung sind abhängig vom Regelungskonzept. Für Kreiselpumpen werden die Drosselregelung sowie die Drehzahlregelung unterschieden.⁴⁹ Bei der Drosselregelung wird durch gezieltes Anpassen des Gegendrucks die Anlagenkennlinie angepasst. Dies resultiert in einer Verschiebung des Betriebspunkts entlang der Pumpenkennlinie (s. Betriebspunkt₁, Abbildung 5-6). Die relative Förderhöhe ist eine Funktion des relativen Volumenstroms (s. Formel 5-2). Bei der Drehzahlregelung erfolgt eine lastspezifische Anpassung der Drehzahl an den Betriebszustand. Dies führt zu einer Parallelverschiebung der Pumpenkennlinie (s. Betriebspunkt₂, Abbildung 5-6). Der Volumenstrom sowie die Förderhöhe werden unter Anwendung des Proportionalitätsgesetzes bestimmt (Recknagel et al. 2007).

Modellendogene Kennfeldauswertung

Der Volumenstrom sowie die Förderhöhe einer Kreiselpumpe stellen sich im Schnittpunkt der Pumpen- und Anlagenkennlinie ein. Die Pumpenkennlinie wird durch die Charakteristik einer Pumpe, die Anlagenkennlinie durch die Rohrnetze (Rohrleitungsdurchmesser, Ventile etc.) beschrieben. Abhängig vom Betriebspunkt verändert sich der Pumpenwirkungsgrad. Die Berechnung des Pumpenwirkungsgrads erfolgt modellendogen in Abhängigkeit der relativen Förderhöhe sowie des relativen Volumenstroms. Dazu sind pumpenspezifische Kennfelder in Form generischer Muscheldiagramme hinterlegt (s. Abbildung 5-6). Auf der Abszisse ist der relative Volumenstrom und auf der Ordinate die relative Förderhöhe aufgetragen. In 10%-Intervallen ist jedem Schnittpunkt aus relativem Volumenstrom und relativer Förderhöhe ein relativer Wirkungsgrad (Quotient aus Wirkungsgrad im Betrieb und Wirkungsgrad im Nennbetriebspunkt) als Stützpunkt zugeordnet.

⁴⁹ Weitere Regelungsschemata für Pumpen sind die Bypass-Regelung sowie die An-/Ausregelung. Bei der Bypass-Regelung wird eine Pumpe bei Volllast betrieben, der überschüssige Volumenstrom wird in einem Regelventil abgezweigt und dem Pumpenvorlauf zugeführt. Die Bypass-Regelung wird insbesondere bei Verdrängerpumpen eingesetzt, da hier eine Drosselregelung technisch nicht möglich ist. Bei der An-/Ausregelung wird eine Pumpe betrieben, bis ein nachgelagerter Behälter gefüllt ist. Anschließend wird die Pumpe abgeschaltet, bis das Mindestfüllvolumen im entsprechenden Behälter unterschritten wird. Es handelt sich um eine Zweipunkt-Regelung, die Pumpe kennt ausschließlich die Zustände ‚Ein‘ und ‚Aus‘. Um ein ständiges Ein- und Ausschalten der Pumpen zu verhindern, wird eine Hysterese verwendet.

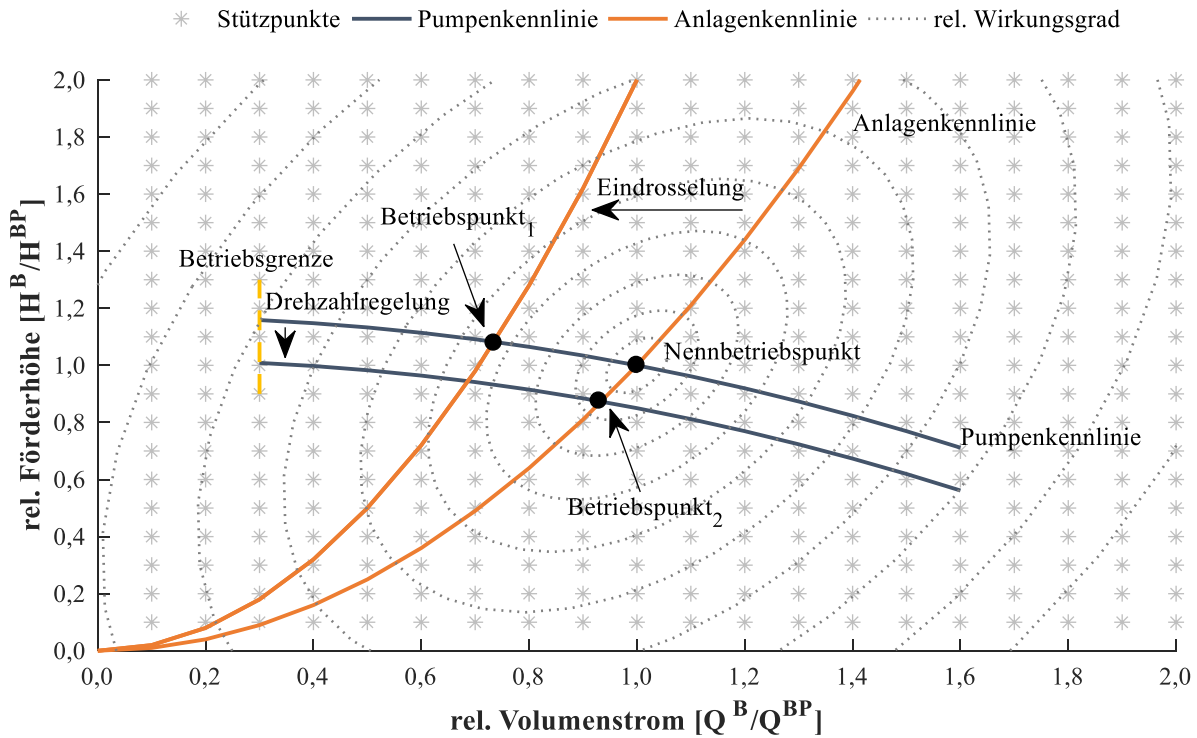


Abbildung 5-6: Generisches Kennfeld einer Kreiselpumpe, Referenztechnologie: Kreiselpumpen des Typen C (ESOB) gemäß Verordnung 547/2012, eigene Berechnung basierend auf Allweiler (2018), Bestimmtheitsmaß der Pumpenkennlinie = 0,9707

Jedem Stützpunkt des relativen Wirkungsgrads ist ein individueller Wert zugeordnet. Dies ergibt für das generische Muscheldiagramm ein Wertegitter mit 400 individuellen Stützpunkten. Die endogene Berechnung des relativen Wirkungsgrads erfolgt durch lineare Interpolation zwischen den Stützpunkten entlang der Ordinate und der Abszisse für jeden Simulationsschritt τ (s. Abbildung 5-7).

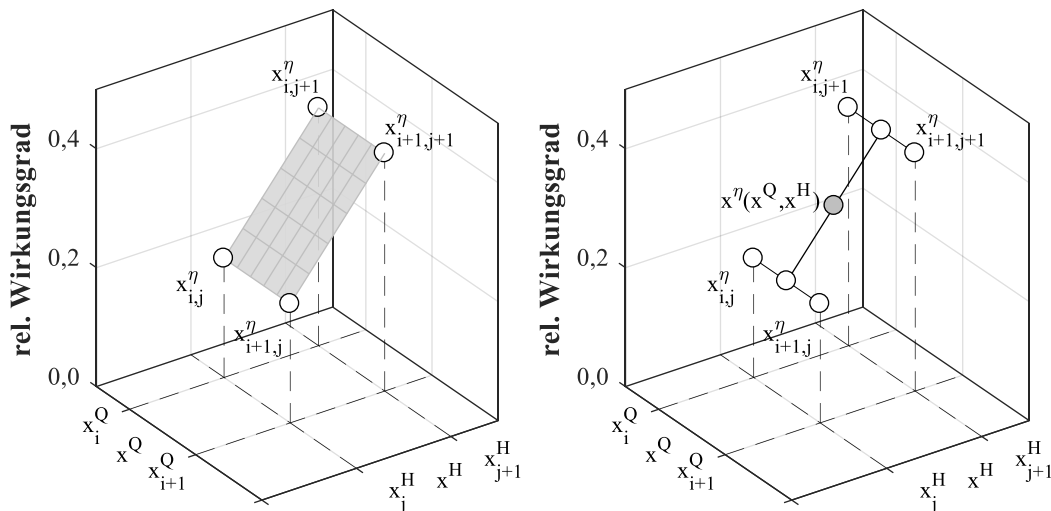


Abbildung 5-7: Schematische Darstellung zur Berechnung des relativen Wirkungsgrads in Abhängigkeit der relativen Förderhöhe respektive des relativen Volumenstroms durch lineare Interpolation zwischen den Stützpunkten, eigene Abbildung nach (Horak 2015)

In MATLAB bietet die Funktion ‚interp2‘ die Möglichkeit zur Interpolation zweidimensionaler Wertegitter. Eingangsgrößen der Funktion sind der relative Volumenstrom, der Nennvolumenstrom, die relative Förderhöhe, die Nennförderhöhe sowie das pumpenspezifische Wertegitter. Durch Multiplikation des relativen Wirkungsgrads im Betrieb mit dem Wirkungsgrad im Nennbetriebspunkt wird der Wirkungsgrad im Betrieb berechnet. Der Wirkungsgrad bei einer Drehzahlregelung, bspw. mittels Frequenzumrichter (FU), entspricht näherungsweise dem Wirkungsgrad im Nennbetriebspunkt (Jaberg o. J.). Betriebsbedingte Wirkungsgradverluste, bspw. durch Kavitation, gehen als exogener Faktor in die Berechnung ein (s. Formel 5-3).

$$\eta_{\tau}^{PU} = \begin{cases} n^{BP} - \eta_{\tau}^{L,PU} & \text{Drehzahlregelung} \\ x_{\tau}^{\eta} * \eta^{BP} - \eta_{\tau}^{L,PU} & \text{andernfalls} \end{cases}, \forall \tau \in \Theta \quad 5-3$$

mit

η_{τ}^{PU}	Wirkungsgrad der Pumpe im Simulationsschritt τ [%]
$\eta_{\tau}^{L,PU}$	Wirkungsgradverluste der Pumpe im Simulationsschritt τ [%]
x_{τ}^{η}	Relativer Wirkungsgrad der Pumpe im Simulationsschritt τ [-]
n^{BP}	Pumpenwirkungsgrad im Nennbetriebspunkt [%]

Die mechanische Antriebsleistung wird durch Division der hydraulischen Leistung durch den Pumpenwirkungsgrad bestimmt (s. Formel 5-4).

$$P_{\tau}^{ME} = \frac{P_{\tau}^{PU}}{\eta_{\tau}^{PU}}, \forall \tau \in \Theta \quad 5-4$$

mit

P_{τ}^{ME}	Mechanische Antriebsleistung der Pumpe im Simulationsschritt τ [kW _{mech}]
-----------------	---

Die mechanische Antriebsleistung stellt die ausgangsseitige Flussvariable des Moduls ‚Pumpe‘ und die eingangsseitige Flussvariable des Moduls ‚Elektromotor‘ dar. Durch Division der mechanischen Antriebsleistung durch den Elektromotorwirkungsgrad, den Wirkungsgrad der Kraftübertragung und – falls vorhanden – den Wirkungsgrad eines Frequenzumrichters wird die elektrische Leistungsaufnahme im Betrieb berechnet. Analog zum Pumpenwirkungsgrad wird der Elektromotorwirkungsgrad anhand hinterlegter Kennfelder für jeden Simulationsschritt in Abhängigkeit der anliegenden mechanischen Last berechnet (s. Formel 5-5):

$$P_{\tau}^{EL,B} = \frac{P_{\tau}^{ME}}{\eta_{\tau}^{EM} * \eta^{FU} * \eta^{KÜ}}, \forall \tau \in \Theta \quad 5-5$$

mit

$P_{\tau}^{EL,B}$	Elektrische Leistungsaufnahme im Betrieb im Simulationsschritt τ [kW _{el}]
η_{τ}^{EM}	Wirkungsgrad des Elektromotors im Simulationsschritt τ [%]
$\eta^{KÜ}$	Wirkungsgrad der Kraftübertragung [%]
η^{FU}	Wirkungsgrad des Frequenzumrichters [%]

Im Leerlauf wird die elektrische Leistungsaufnahme über einen technologiespezifischen Teillastfaktor bestimmt. Bei Nichtbetrieb wird keine elektrische Energie bezogen (s. Formel 5-6):

$$P_{\tau}^{EL} = \begin{cases} \text{Betrieb} & P_{\tau}^{EL,B} \\ \text{Standby} & x^{TL} * P^{BP} \\ \text{Aus} & 0 \end{cases}, \forall \tau \in \Theta \quad 5-6$$

mit

P_{τ}^{EL}	Elektrische Leistungsaufnahme im Simulationsschritt τ [kW _{el}]
P^{BP}	Mechanische Nennanschlussleistung [kW _{mech}]
x^{TL}	Technologiespezifischer Teillastfaktor [-]

Der jährliche Endenergiebedarf entspricht der Summe der elektrischen Leistungsaufnahme der einzelnen Zeitsegmente. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen wird der Umrechnungsfaktor ψ eingeführt (s. Formel 5-7):

$$E^{EL} = \psi * \sum_{\tau \in \Theta} P_{\tau}^{EL} \quad 5-7$$

mit

E^{EL}	Jährlicher Endenergiebedarf [MWh/a]
ψ	Umrechnungsfaktor zur Berücksichtigung der unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen [generisch]

Tabelle 5-1 zeigt die implementierten Energieeffizienzmaßnahmen für Pumpensysteme.

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der implementierten Energieeffizienzmaßnahmen für Pumpensysteme

Nr.	Energieeffizienzmaßnahmen ¹⁾	Kurzbeschreibung
PU01	Dimensionierung Pumpe	Auswahl einer passend dimensionierten Pumpe.
PU02	Beseitigung Leckagen	Beseitigung bestehender Leckagen, bspw. an Ventilstationen.
PU03	Reduktion Druckverluste	Reduktion der Druckverluste im Verteilsystem, bspw. durch Beseitigung überflüssiger Ventile.
PU04	Effizientere Pumpe	Einsatz einer Pumpe mit verbessertem Wirkungsgrad.
PU05	Wartung Pumpe	Durch regelmäßige Wartung der Pumpen wird einer zeitlichen Degradation des Wirkungsgrads vorgebeugt.
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	Unter Berücksichtigung der zulässigen Schalthäufigkeit des Motors erfolgt ein zeitgesteuertes Abschalten bei Nichtbetrieb.
PU07	Dimensionierung Elektromotor	Auswahl eines passend dimensionierten Elektromotors.
PU08	Effiziente Kraftübertragung	Einsatz einer Kraftübertragung mit verbessertem Wirkungsgrad.
PU09	Effizienter Elektromotor	Einsatz eines Elektromotors mit verbessertem Wirkungsgrad.
PU10	Frequenzumrichter	Einsatz eines Frequenzumrichters zur lastspezifischen Reduktion der Motordrehzahl.
PU11	Wartung Elektromotor	Durch regelmäßige Wartung der Elektromotoren wird einer zeitlichen Degradation des Wirkungsgrads vorgebeugt.

¹⁾ Zusammenstellung basierend auf (Motor Challenge 2013; Hesselbach 2012; McKane und Hasanbeigi 2011; Waide und Brunner 2011; Pehnt et al. 2011; UNIDO 2010; da Costa Bortoni 2009; Pehnt et al. 2009; Kaya et al. 2008; Berger et al. 2005; U.S. Department of Energy 2002; Almeida und Greenberg 1995).

5.2.3 Kopplung der Energienutzung und -versorgung

Neben der Kopplung der Energienutzung und -versorgung durch den Nutzenergiebedarf erfolgt eine Kopplung durch den Wärmeeintrag der Anlagen und der Beleuchtung in die Infrastruktur sowie durch die Möglichkeit zur Nutzung der verfügbaren Abwärme in der Infrastruktur.

Integration der Strahlungswärme in die Infrastruktur

Dem generischen Referenzenergiesystem der Typbetriebe (vgl. Abbildung 5-2, S. 65) ist eine Verbindung der einzelnen Verfahrensschritte in der Energieversorgung durch die Flüsse ‚nutzbare Abwärme‘ und ‚Strahlungswärme‘ zu entnehmen. Dadurch kommt es zu Verbindungen zwischen Prozessen unterschiedlicher zeitlicher Auflösungen (s. Abschnitt 5.1.2). Die Strahlungswärme respektive die nutzbare Abwärme der Produktionsversorgung I und II sowie der Infrastrukturbeleuchtung bilden die eingangsseitigen Güterflüsse zur Infrastrukturversorgung. Da für letztere aufgrund der gegebenen Temperaturabhängigkeit eine zeitliche Auflösung von 8.760 stündlichen Zeitsegmenten innerhalb eines Jahres vorgegeben ist, sind die Strahlungswärme sowie die nutzbare Abwärme in selbige zeitliche Auflösung zu überführen. Dazu werden für diskontinuierliche Prozesse zunächst die sekundlichen respektive minütlichen Zeitsegmente zu stündlichen Zeitsegmenten aggregiert. Anschließend erfolgt für die kontinuierlichen und diskontinuierlichen Prozesse eine Allokation der Typtage (Arbeits- und Ruhetage) mit 24 stündlichen Zeitsegmenten entsprechend den unternehmensspezifischen Produktionsplänen zu einer Jahresperiode mit 8.760 stündlichen Zeitsegmenten (s. Abbildung 5-5, S. 69). Im Anschluss an die Berechnung der jährlichen Lastprofile in stündlicher Auflösung für die wärmeeintragenden Verbraucher erfolgt die Berechnung des kumulierten Wärmeeintrags aller Verbraucher.

Integration der Wärmerückgewinnungskonzepte in die Infrastruktur

Die Nutzung der verfügbaren Abwärme, bspw. an Druckluftkompressoren, stellt neben der Integration der Strahlungswärme in die Raumwärmebedarfsrechnung die zweite Verbindung zwischen Verfahrensschritten der Energieversorgung und der Energienutzung dar. Die Verbindung der Flüsse unterschiedlicher zeitlicher Auflösungen erfolgt analog zur Strahlungswärme. Darüber hinaus ist bei der energetischen Bewertung der nutzbaren Abwärme die Gleichzeitigkeit zwischen Raumwärmebedarf und verfügbarer Abwärme entscheidend. Dabei ist zwischen Heizungssystemen mit und ohne Wärmepufferspeicher zu differenzieren. Für Heizungssysteme ohne Wärmespeicher wird zur Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit die verfügbare Abwärme vom Raumwärmebedarf subtrahiert. Überschreitet die verfügbare Abwärme in einem Simulationsschritt den Raumwärmebedarf, kann dieser komplett gedeckt werden. Eine Überdeckung des Raumwärmebedarfs ist nicht möglich, d. h., in Zeiten, in denen die verfügbare

Abwärme den Raumwärmebedarf überschreitet, kann die verfügbare Abwärme nicht vollständig genutzt werden. Die tatsächlich genutzte Abwärme wird durch Subtraktion des residualen Raumwärmebedarfs vom Raumwärmebedarf ohne Wärmerückgewinnung ermittelt (s. Formel 5-8).

$$P_{\tau}^{HEAT_RES} = \begin{cases} P_{\tau}^{HEAT} - P_{\tau}^{WASTE} & \text{für } P_{\tau}^{WASTE} < P_{\tau}^{HEAT} \\ 0 & \text{für } P_{\tau}^{WASTE} \geq P_{\tau}^{HEAT} \end{cases}, \forall \tau \in \Theta \quad 5-8$$

mit

τ	Simulationsschritt
$P_{\tau}^{HEAT_RES}$	Residualer Raumwärmebedarf im Simulationsschritt τ [kW _{th}]
P_{τ}^{HEAT}	Raumwärmebedarf im Simulationsschritt τ [kW _{th}]
P_{τ}^{WASTE}	Verfügbare Abwärme im Simulationsschritt τ [kW _{th}]

und den Mengen

Θ	Simulationsschritte im Betrachtungszeitraum
----------	---

Im Gegensatz zu Heizungssystemen ohne Wärmepufferspeicher kann bei der Wärmerückgewinnung in Heizungssystemen mit Pufferspeicher die anfallende Abwärme, die den Raumwärmebedarf überschreitet, zum Aufladen des Wärmepufferspeichers genutzt werden. Erst wenn der Raumwärmebedarf durch die verfügbare Abwärme gedeckt und gleichzeitig der Wärmepufferspeicher vollständig gefüllt ist, kann die Abwärme nicht weiter genutzt werden.

5.3 Modellparametrierung

In den Abschnitten 5.3.1 und 5.3.2 erfolgt eine Dokumentation der wesentlichen Daten und Rahmenannahmen sowie der verwendeten Datenerhebungsmethoden.

5.3.1 Technologiebestand

Der Fokus der Analyse liegt im Rahmen dieser Arbeit auf den Energieeffizienzpotenzialen für Querschnittstechnologien. Der Definition in Abschnitt 2.1.2 folgend umfasst dies die Beleuchtung, Motorsysteme (Elektromotoren, Pumpen, Ventilatoren, Druckluftkompressoren), Kältemaschinen (Prozess- und Klimakälte) sowie Heizungsanlagen. Für die genannten Querschnittstechnologien werden jeweils die – gemessen an der Marktdurchdringung – relevantesten Technologien und Prozesse implementiert und in die vier Effizienzklassen ‚Gering‘, ‚Standard‘, ‚Hoch‘ und ‚Beste Verfügbare Technologie (BVT)‘ untergliedert. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Anwendungen ist eine vollständige Abdeckung aller im Bestand befindlichen Technologien nicht realistisch. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus daher auf den – gemessen am Endenergieverbrauch – relevantesten Technologien bzw. Verbrauchern. Technologien, die nur einen geringen Anteil am Endenergieverbrauch eines Typbetriebs aufweisen,

sind nicht Teil dieser Betrachtung. Dies sind typischerweise Kleinstverbraucher oder Verbraucher mit geringen Betriebsstunden. Die Parametrisierung der unterschiedlichen Technologien erfolgt durch eine Kombination aus Primär- und Sekundärdatenerhebung. Als Datengrundlage zur Technologieauswahl dienen, falls vorhanden, die als Folge der Ökodesign-Richtlinie (Richtlinie 2009/125/EG) entstandenen Vorstudien (u. a. van Tichelen et al. 2017; Kubiak et al. 2015) sowie die daraus abgeleiteten Verordnungen zur Definition von Mindesteffizienzanforderungen (u. a. Verordnung (EG) Nr. 640/2009). Zur Herleitung generischer Anlagen- und Wirkungsgradkennlinien dienen primär reale Technologiekennfelder und Herstellerdatenblätter (u. a. Allweiler 2018) sowie, falls vorhanden, die bestehenden Vorstudien zur Ökodesign-Richtlinie (u. a. van Elburg und von den Boorn 2017).

5.3.2 Energieeffizienzmaßnahmen

Die Auswahl der Energieeffizienzmaßnahmen erfolgt unter Berücksichtigung der Definitionen in Abschnitt 2.1.1. Folglich werden ausschließlich Maßnahmen berücksichtigt, die eine Endenergieeinsparung zum Ziel haben und bei normalisiertem Nutzen nachweislich zu einer Endenergieeinsparung führen. Somit werden Endnutzer-Aktivitäten, aber keine Unterstützungsmaßnahmen berücksichtigt. Energieeffizienzmaßnahmen, die unter heutigen wirtschaftlichen Gesichtspunkten keinesfalls realisierbar sind, werden ebenfalls nicht betrachtet. Ferner liegt der Fokus im Rahmen dieser Arbeit auf Energieeffizienzmaßnahmen für Querschnittstechnologien (bspw. effizientere Elektromotoren) sowie Energieeffizienzmaßnahmen mit Querschnittscharakter (bspw. Gebäudedämmung). Maßnahmen, die einen Eingriff in den Produktionsprozess bedeuten bzw. einen branchenspezifischen Charakter aufweisen (bspw. der Austausch einer Spritzgussmaschine), sind nicht Teil der vorliegenden Arbeit. Maßnahmen der Material- und Ressourceneffizienz sowie Maßnahmen, die derzeit keine Marktreife besitzen, sind ebenfalls nicht Teil dieser Untersuchung.

Analog zum Technologiebestand erfolgt die Parametrisierung der Energieeffizienzmaßnahmen durch eine Kombination aus Primär- und Sekundärdatenerhebung. Zunächst werden mittels Sekundäranalyse existierende Energieeffizienzmaßnahmen identifiziert. Als Datengrundlage dienen primär Peer-Review-Zeitschriften (u. a. McKane und Hasanbeigi 2011). Diese werden um die Auswertung von (inter-)nationalen Berichten, Leitfäden und Best-Practice-Beispielen von öffentlichen Einrichtungen und Ämtern, Verbänden und Anlagenherstellern ergänzt (u. a. U.S. Department of Energy 2002). Liegt keine vollständige Dokumentation der erforderlichen Parameter (bspw. Veränderung der betriebsgebundenen Kosten) vor, erfolgt eine ergänzende Primärdatenerhebung. Dazu werden Preislisten ausgewertet und Anlagenhersteller kontaktiert (u. a. Siemens AG 2015a, 2015b). Sind auch auf diesem Weg keine Daten zugänglich, werden fehlende Parameter auf Basis eigener Annahmen ergänzt.

Die Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme ist mit kapital- und betriebsgebundenen Kosten verbunden. Diese werden maßnahmenspezifisch anhand hinterlegter Kostenfunktionen

bestimmt. In Anhang B (Tabelle B-4 bis Tabelle B-10, S. 179 ff.) sind die Kostenfunktionen für die spezifische Investition (inkl. Montage) und die Veränderung der betriebsgebundenen Kosten der identifizierten Energieeffizienzmaßnahmen zusammengefasst (vgl. ökonomische Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen in Abschnitt 4.3). Die monetäre Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen erfolgt „inflationbereinigt [...] mit realen Zinssätzen und Preissteigerungsraten [...]“ (Konstantin 2017) für das Basisjahr 2015 mit dem Euro als Währung (EUR₂₀₁₅). Verwendete Wechselkurse zur Umrechnung von Fremdwährungen basieren auf European Central Bank (2017) und sind in Anhang B (Tabelle B-3, S. 178) dokumentiert. Die Preisumrechnung auf das Basisjahr 2015 erfolgt unter Verwendung des durchschnittlichen Preisindizes der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Anhang B: Tabelle B-2, S. 178) gemäß Statistisches Bundesamt (2018a). Abbildung 5-8 zeigt exemplarisch die Kostenfunktion sowie den Nennwirkungsgrad von Elektromotoren der Effizienzklasse ‚BVT‘.

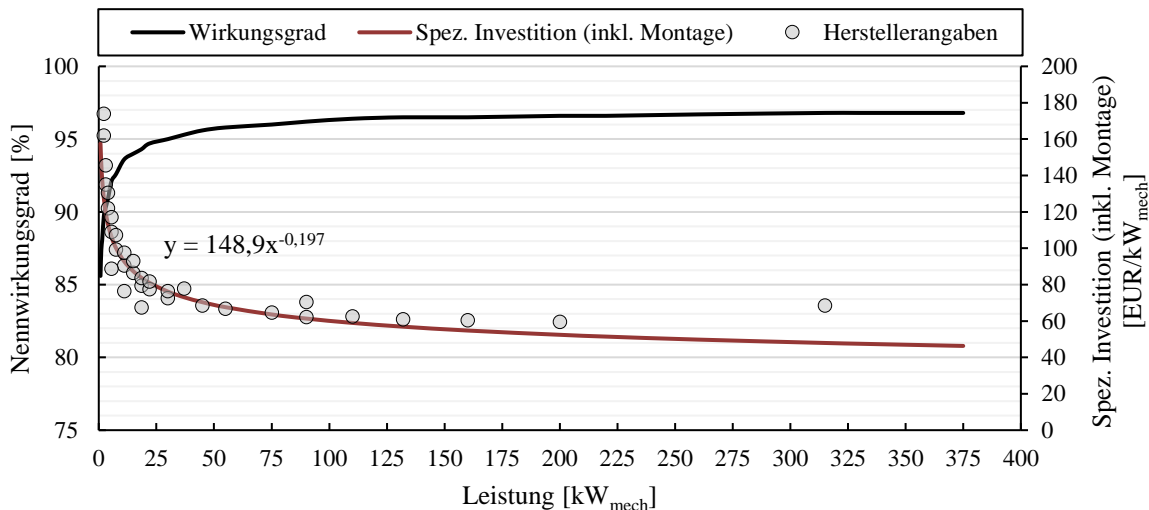


Abbildung 5-8: Wirkungsgrad- und Kostenfunktion der spez. Investition (inkl. Montage) für Elektromotoren der Effizienzklasse ‚BVT‘ (Referenztechnologie: IE4-Asynchronmotor gemäß IEC 60034-30-1), eigene Berechnung der Kostenfunktion basierend auf (Kienle Antriebssysteme 2016; Jung 2016; Siemens AG 2015a, 2015b; Kemmerich Elektromotoren 2015; VEM 2015; Gefran 2013; McKane und Hasanbeigi 2011), ergänzt um eigene Annahmen

5.4 Plausibilisierung

Die Qualität der Ergebnisse einer modellbasierten Analyse sowie die Qualität des eingesetzten Modells sind eine Funktion der Eingangsparameter und der getroffenen Annahmen, des verwendeten Modells sowie der Eignung des Modells für eine konkrete Fragestellung. Im Zuge der Bewertung der Qualität eines Modells werden im wissenschaftlichen Kontext die Begriffe ‚Verifizierung‘ und ‚Validierung‘ (teils synonym) verwendet. Im etymologischen Sinne impliziert die Verifizierung, bestehend aus den lateinischen Wörtern ‚verus‘ (wahr) und ‚facere‘ (tun, machen), die Wahrheit einer Aussage oder Behauptung. Im Gegensatz zur Verifizierung beansprucht das Wort Validierung nicht die Wahrheit, sondern vielmehr eine gewisse Form

der Legitimierung, sodass bspw. eine Argumentation frei von logischen Fehlern ist (Oreskes et al. 1994). In der theoretischen Wissenschaftsphilosophie existieren mit Blick auf die Verifizierung einer Hypothese unterschiedliche Lehren (Konikow und Bredehoeft 1992). Beispielsweise vertritt der Positivismus die Auffassung, eine Hypothese sei durch Experimente verifizierbar. Demgegenüber gibt es im kritischen Rationalismus keine Verifikation. Eine Hypothese habe lediglich solange Gültigkeit, bis diese widerlegt wird (Popper 1935 in Konikow und Bredehoeft 1992). Übertragen auf die Energiesystemanalyse stellt sich die Frage, inwieweit Energiemodelle verifiziert oder validiert werden können und welche Rolle dies in energiewirtschaftlichen Diskussionen spielt. Nach Einschätzung von Konikow und Bredehoeft (1992) werden die Begriffe Validierung und Verifizierung in der Wissenschaft unter anderem verwendet, um den Ergebnissen einer Untersuchung eine gewisse Gültigkeit zu verleihen. Dies ist nach Auffassung von Oreskes et al. (1994) problematisch, wenn die Ergebnisse eines Modells durch die Verwendung der Begriffe Verifizierung und Validierung implizit als Wahrheit dargestellt werden und zur Untermauerung politischer Entscheidungen dienen. Oreskes et al. (1994) diskutieren die Rolle von Modellen in der Wissenschaft und argumentieren, dass Modelle von offenen Systemen, in denen die einzelnen Prozesse nicht vollständig verstanden sind bzw. in denen die notwendige empirische Datengrundlage unvollständig ist, niemals verifiziert werden könnten. Unsicherheiten seien somit modellinhärent (Oreskes et al. 1994). Der Nutzen eines Modells wird dadurch jedoch in keiner Weise infrage gestellt. Mit Blick auf die Unsicherheit von Energiemodellen schrieb Voß (1982) in diesem Zusammenhang: „[...] unter der Illusion von Gewißheit zu entscheiden, erscheint mir weitaus gefährlicher, als Entscheidungen im vollen Bewußtsein von Ungewißheit zu treffen“. Oreskes et al. (1994) schlagen vor, anstelle einer Verifizierung von einer Plausibilisierung (engl. *confirmation*) zu sprechen. Fallen die Ergebnisse einer Plausibilisierung – bspw. durch den Vergleich von Modellergebnissen mit Realdaten – positiv aus, so sei ein Modell präzise oder akkurat und werde, in Abhängigkeit der Anzahl und Diversität der verfügbaren Realdaten, mit großer Wahrscheinlichkeit auch zukünftig akkurate Ergebnisse liefern. Dies impliziere in einem offenen, durch äußere Einflüsse determinierten, System aber weder, dass das Modell verifiziert sei und somit wahre Ergebnisse liefere, noch, dass das Modell auch für zukünftige Untersuchungen präzise Ergebnisse liefern werde (Oreskes et al. 1994). Saltelli et al. (2008) schrieben in diesem Zusammenhang: „Most modellers today would probably agree that a model cannot be validated, in the sense of ‘be proven true’. Rather, it is more defensible and correct to say that a model has been extensively corroborated, meaning by this that the model has survived a series of tests – be they formal, of internal consistency, or relative to the model’s capacity to explain or predict the ‘world’ in a convincing and parsimonious way” (Saltelli et al. 2008).

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel der folgenden Analyse, anhand von Parametervariationen und Variantenrechnungen zu zeigen, dass das entwickelte Modell sowie der entwickelte heuristische Optimierungsansatz für eine große Anzahl an vielseitigen Parametervariationen

und Variantenrechnungen zu plausiblen und konsistenten Ergebnissen führen und – im Vergleich zum Stand der Forschung – eine methodische Weiterentwicklung darstellen, die es erlaubt, Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen zu berücksichtigen und adäquat abzubilden. Dazu werden einleitend in Abschnitt 5.4.1 die für diese Analyse relevanten Rahmenannahmen dokumentiert. Anschließend erfolgt in Abschnitt 5.4.2 die Plausibilisierung der Energieeffizienzmaßnahmenbewertung für die im entwickelten Energienachfragemodell abgebildeten Querschnittstechnologien. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 5.4.3 die Güte des heuristischen Optimierungsalgorithmus in Kombination mit den erarbeiteten Modellierungsvorschriften bewertet und mit der Einzelbewertung sowie der statisch-faktoriellen Bewertung von Energieeffizienzmaßnahme verglichen. Im Zuge der Plausibilisierung wird bewusst auf die Begriffe der Verifizierung und Validierung verzichtet, da diese eine Form der Sicherheit suggerieren, die – folgt man der theoretischen Wissenschaftsphilosophie des kritischen Rationalismus – durch die Verwendung von Energiemodellen nicht gegeben ist.

5.4.1 Dokumentation der Rahmenannahmen

Die Plausibilisierung gliedert sich in zwei inhaltliche Abschnitte. Zunächst erfolgt eine Plausibilisierung der Technologiemodellierung sowie der Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen. Anschließend wird das entwickelte Verfahren zur integrierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen, insbesondere die heuristische Optimierung, plausibilisiert.

Plausibilisierung der Technologiemodellierung

Eine Möglichkeit zur Modellplausibilisierung ist der Abgleich der Modellergebnisse mit realen Messreihen. Bei der Energiemodellierung ist dies aufgrund fehlender Realdaten sowie fehlender Ressourcen für die Erhebung von Realdaten in der Regel nicht oder nur begrenzt möglich.⁵⁰ Voß (2010) empfiehlt daher zur Plausibilisierung der getroffenen Annahmen sowie zur Identifikation von Implementierungsfehlern eine Sensitivitätsanalyse bzw. Parametervariation. Dieser Empfehlung folgend, werden für die im entwickelten Energienachfragemodell abgebildeten Querschnittstechnologie und Energieeffizienzmaßnahme unterschiedliche Varianten berechnet, die ein möglichst breites Spektrum realitätsnaher Betriebszustände der betrachteten Technologien abbilden. Es werden je Querschnittstechnologie sieben synthetische Lastprofile mit

⁵⁰ Eine Ausnahme stellt in diesem Zusammenhang die Druckluftversorgung dar. Dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung liegen aus der Durchführung eines Energieaudits mit dem Fokus auf die Druckluftversorgung reale Messreihen vor. Diese Messreihen umfassen den Druckluftbedarf, das Druckniveau sowie den Endenergieverbrauch für ein System mit drei im Verbund betriebenen Kompressoren. Diese Daten wurden für eine Plausibilisierung des entwickelten Technologiemo­dells verwendet. Eingabedaten sind der Druckluftbedarf und die Technologiekonfiguration. Als Ergebnis wurde der berechnete Endenergieverbrauch mit dem gemessenen Endenergieverbrauch verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Schaltverhalten der Kompressoren im Modell dem im Energieaudit vorzufindenden Schaltverhalten entspricht. Die Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Endenergieverbrauch beträgt ca. 6,5 %.

einer durchschnittlichen Auslastung zwischen 40 und 100 % verwendet. Ferner werden die wesentlichen Technologiedaten (Dimensionierung, Effizienzklasse und Regelungskonzept) variiert (je Lastprofil fünf unterschiedliche Technologiekonfigurationen). Tabelle 5-2 fasst ausgewählte Determinanten der Parametervariation zusammen. Unter Berücksichtigung der Anzahl an Energieeffizienzmaßnahmen je Querschnittstechnologie erfolgt die Bewertung von 2.415 Parametervariationen. Zur Einordnung der Ergebnisse wird das berechnete Endenergieeinsparpotenzial der Energieeffizienzmaßnahmen mit den in der Literatur konstatierten Werten verglichen und bewertet. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 5.4.2 zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Zusammenfassung ausgewählter Determinanten der Parametervariationen der Querschnittstechnologien

	Dimensionierung			Lastprofil ¹⁾			Energieeffizienzmaßnahmen	Varianten
	#	Wert	Einheit	#	Wert	Einheit		
Beleuchtung ²⁾	35	5–20	W/m ²	1	-	-	3	105
Motorensysteme								
Elektromotoren	5	5,5–200	kW _{mech}	7	40–100	%	6	210
Ventilatoren	5	200–2.500	m ³ /min	7	40–100	%	10	350
Pumpen	5	0,3–5	m ³ /min	7	40–100	%	11	385
Druckluftkompressoren	5	1–10,5	m ³ /min	7	40–100	%	14	490
Kälteerzeugung	5	30–200	kW _{th}	7	40–100	%	14	490
Raumwärme	5	50–250	kW _{th}	7	40–100	%	11	385
Gesamt	-	-	-	-	-	-	-	2.415

¹⁾ Die Bezugsgröße für das Lastprofil [%] ist die unter ‚Dimensionierung‘ angegebene Größe (bspw. die Nennanschlussleistung eines Elektromotors in kW_{mech}). Eine Ausnahme stellt die Beleuchtung dar.

²⁾ Für die Berechnung der Beleuchtung ist die Definition von Lastprofilen nicht vorgesehen. Entsprechend werden für die genannten Technologien je 35 unterschiedliche Technologiekonfigurationen berechnet.

#	Anzahl
---	--------

Plausibilisierung der Bewertungsverfahren

Ziel der folgenden quantitativen Analysen ist die Bewertung der Güte der bestehenden Approximationsalgorithmen (s. Abschnitt 3.3) sowie des entwickelten Verfahrens zur integrierten Bewertung mit Blick auf die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen. Grundsätzlich bieten heuristische Verfahren keine Lösungs- sowie Optimalitätsgarantie (Grünig und Kühn 2013). Die Bewertung der Güte der bestehenden Approximationsalgorithmen bzw. der integrierten Bewertung kann aber durch den Vergleich der optimierten Lösung (Ergebnis der bestehenden Approximationsalgorithmen bzw. der integrierten Bewertung) mit der optimalen Lösung erfolgen. Im Falle der Bewertung interagierender Energieeffizienzmaßnahmen bietet die Exhaustionsmethode (engl. *brute-force search*), d. h. die Berechnung aller existierenden Lösungen, eine Möglichkeit zur Berechnung der optimalen Lösung. Analog zur Einzelbewertung erfolgt die Bewertung der Güte der Heuristik mittels Parametervariation. Dazu werden 720 unterschiedliche Varianten definiert. Diese Varianten bilden ein breites Spektrum möglichst realitätsnaher Betriebszustände der betrachteten Querschnittstechnologien ab. Für jede Variante werden drei bis sechs interagierende Energieeffizienzmaß-

nahmen bewertet. Eine Bewertung von mehr als sechs Energieeffizienzmaßnahmen wäre aufgrund der überexponentiell ansteigenden Rechendauer beim Einsatz der Exhaustionsmethode zur Bestimmung der optimalen Lösung als Referenz des Methodenvergleichs nur mit äußerst großem Zeitaufwand möglich (s. Abschnitt 4.2). Es erfolgt ein Vergleich folgender Methoden:

- **Einzelbewertung:** Die Berechnung des Endenergieeinsparpotenzials erfolgt modellbasiert⁵¹, wobei auf eine Berücksichtigung von Wechselwirkungen verzichtet wird.
- **Statisch-faktorielle Bewertung:** Die Berechnung des Endenergieeinsparpotenzials erfolgt kennzahlenbasiert (prozentuales Endenergieeinsparpotenzial). Das prozentuale Endenergieeinsparpotenzial wird auf Basis der Ergebnisse der Einzelbewertung definiert.⁵¹ Zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen wird die sequenzielle Bewertung eingesetzt.
- **Integrierte Bewertung:** Die Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen erfolgt modellbasiert mit endogener Berechnung des Endenergieeinsparpotenzials in Kombination mit dem entwickelten heuristischen Optimierungsalgorithmus.
- **Exhaustionsmethode:** Analog zur integrierten Bewertung erfolgt die modellbasierte Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen mit endogener Berechnung des Endenergieeinsparpotenzials. Es erfolgt eine Optimierung durch vollständige Enumeration aller möglichen Maßnahmenpermutationen.

Die Ergebnisse des Methodenvergleichs sind in Abschnitt 5.4.3 zusammengefasst.

5.4.2 Technologimodellierung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Plausibilisierung für die im entwickelten Energienachfragemodell abgebildeten Querschnittstechnologien beschrieben. Dazu sind die technologie- und maßnahmenspezifischen Ergebnisse in Form von Boxplots dargestellt. Als Vergleichsindex dienen die im Rahmen eines Studienvergleichs ermittelten Endenergieeinsparpotenziale der Energieeffizienzmaßnahmen.⁵² In einigen Studien wird das Endenergieeinsparpotenzial einer Energieeffizienzmaßnahme nicht als ein einziger Wert, sondern als Wertebereich (bspw. ein Endenergieeinsparpotenzial von 5–15 %) formuliert. In diesem Fall wird der Mittelwert des Wertebereichs aufgetragen. Abbildung 5-9 verdeutlicht exemplarisch die Berechnung und

⁵¹ Würden zur Definition des prozentualen Endenergieeinsparpotenzials die Ergebnisse der Literatursichtung eingesetzt, käme es bereits aufgrund der unterschiedlichen Annahmen zu Abweichungen zwischen der Einzelbewertung, der statisch-faktoriellen Bewertung sowie der integrierten Bewertung. Durch die modellbasierte Herleitung des prozentualen Endenergieeinsparpotenzials sind Abweichungen ausschließlich auf methodische Unterschiede der Bewertungsverfahren zurückzuführen.

⁵² Studienvergleich: (Kuder 2014; Bauernhansl 2014; Kulterer und Mair 2013; McKane und Hasanbeigi 2011; BMWi 2010; UNIDO 2010; da Costa Bortoni 2009; Europäische Kommission 2006; Prognos AG 2006; Berger et al. 2005; U.S. Department of Energy 2002, 2001; Radgen 2002; Radgen und Blaustein 2001; Almeida und Greenberg 1995).

Interpretation der Boxplots. Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 5.4.1 werden je Energieeffizienzmaßnahme 35 unterschiedliche Varianten berechnet. Durch Division des Endenergieeinsparpotenzials durch den Endenergieverbrauch vor Umsetzung der Energieeffizienzmaßnahme wird das prozentuale Endenergieeinsparpotenzial der jeweiligen Energieeffizienzmaßnahmen ermittelt. Dies ist in Abbildung 5-9 durch 35 Datenpunkte (Modellberechnung) in Form von Rauten dargestellt. Diese Datenpunkte werden zu einem Boxplot zusammengefasst. Die Antennen des Boxplots visualisieren jeweils das minimale respektive das maximale Endenergieeinsparpotenzial. Die Datenpunkte zwischen dem oberen und dem unteren Quartil umfassen 50 % aller Datenpunkte und werden als Box dargestellt.

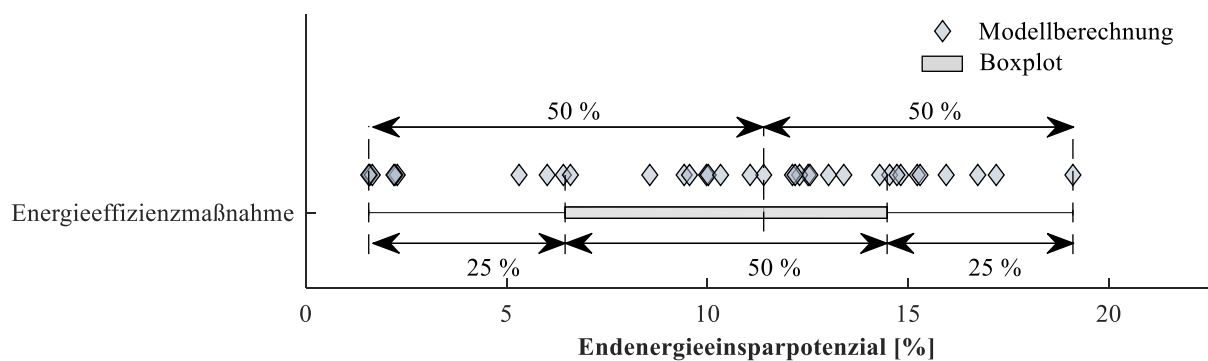


Abbildung 5-9: Exemplarische Darstellung der Ergebnisse der Modellplausibilisierung in Form eines Boxplots

Übergreifend zeigen die Ergebnisse der Parametervariationen, dass die erarbeiteten Modelle für die Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen plausible Ergebnisse generieren. Extremwerte einzelner Energieeffizienzmaßnahmen können durch eine variantenspezifische Analyse begründet und somit plausibilisiert werden. Nachfolgend werden exemplarisch die Ergebnisse für Elektromotoren dargestellt. Weiterführende Ergebnisse sind in Anhang C (Abbildung C-1 bis Abbildung C-7, S. 187 ff.) dokumentiert.

Elektromotoren

Abbildung 5-10 zeigt das Endenergieeinsparpotenzial der Energieeffizienzmaßnahmen für Elektromotoren für die in Abschnitt 5.4.1 dargestellten Parametervariationen in Form von Boxplots. Ferner ist für selbige Energieeffizienzmaßnahmen das in der Literatur dargestellte Endenergieeinsparpotenzial dargestellt. Maßnahmenübergreifend ist festzustellen, dass das in der Literatur vorzufindende Endenergieeinsparpotenzial der Energieeffizienzmaßnahmen variiert. Beispielsweise wird das Endenergieeinsparpotenzial durch die Dimensionierung von Elektromotoren mit 2–10 % beziffert (McKane und Hasanbeigi 2011; da Costa Bortoni 2009; Berger et al. 2005). Das Endenergieeinsparpotenzial durch den Einsatz effizienterer Elektromotoren solle 3–15 % betragen (McKane und Hasanbeigi 2011; Berger et al. 2005; U.S. Department of Energy 2001).

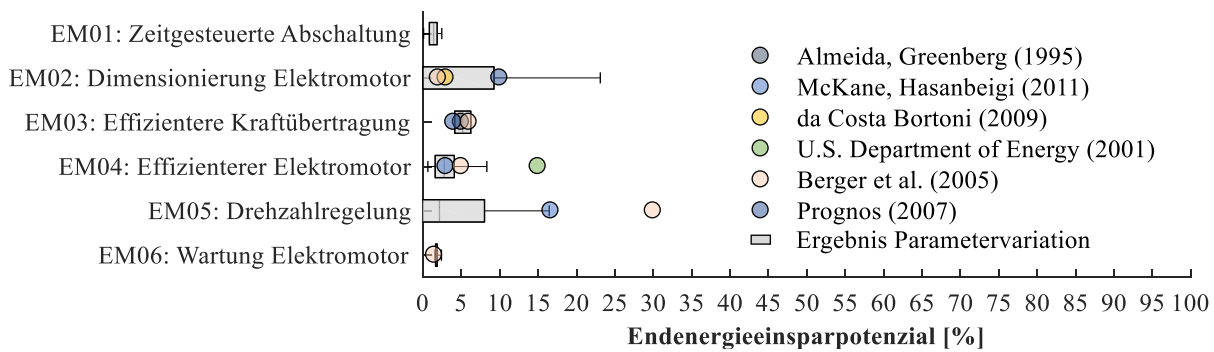


Abbildung 5-10: Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Elektromotoren

Ein Vergleich der Literaturwerte mit den Ergebnissen der Variantenrechnungen zeigt, dass sich das mittlere berechnete Endenergieeinsparpotenzial mit den Literaturwerten überschneidet. Abweichungen sind beispielsweise für die Energieeffizienzmaßnahme EM02 Dimensionierung eines Elektromotors vorzufinden. Dies wird nachfolgend exemplarisch dargelegt. Für die Auswahl eines korrekt dimensionierten Elektromotors wird zunächst die maximal anliegende mechanische Last bestimmt und mit einem Sicherheitsfaktor multipliziert. Überschreitet die mechanische Nennanschlussleistung des Elektromotors die maximal erforderliche Leistung, wird endogen der, unter Berücksichtigung des Sicherheitszuschlags, kleinstmögliche Elektromotor ausgewählt. In den betrachteten Parametervariationen wird das maximale Endenergieeinsparpotenzial von ca. 23 % für einen Elektromotor der Effizienzklasse ‚Standard‘ (Referenztechnologie: IE2-Asynchronmotor gemäß IEC 60034-30-1) mit einer Nennanschlussleistung von $200 \text{ kW}_{\text{mech}}$ bei einer durchschnittlichen Auslastung von 40,0 % ($\pm 5,0 \%$) erzielt. Der Wirkungsgrad des $200 \text{ kW}_{\text{mech}}$ Elektromotors beträgt bei Vollast 95,1 % und reduziert sich im Teillastbetrieb auf 70,4 % (bei 40,0 % der Nennanschlussleistung). Für die Deckung der maximalen mechanischen Last (inkl. Sicherheitszuschlag) ist ein $110 \text{ kW}_{\text{mech}}$ Elektromotor der Effizienzklasse ‚Standard‘ ausreichend. Dieser verfügt über einen Nennwirkungsgrad von 94,5 %, im Teillastbetrieb sinkt der Wirkungsgrad auf 91,7 % (bei 81,8 % der Nennanschlussleistung). Dies führt zu einer Reduktion der mittleren elektrischen Leistungsaufnahme von $125 \text{ kW}_{\text{el}}$ auf $96 \text{ kW}_{\text{el}}$ und folglich zu einem Endenergieeinsparpotenzial von ca. 23 %. Dem Boxplot ist zu entnehmen, dass das Endenergieeinsparpotenzial von ca. 23 % bei der Dimensionierung eines Elektromotors einen Ausreißer darstellt, da in der zugrunde liegenden Variantenrechnung ein signifikant überdimensionierter Elektromotor eingesetzt wird. In 75 % der berechneten Varianten beträgt das durch die Dimensionierung eines Elektromotors erzielbare Endenergieeinsparpotenzial 0–10 %. Dies deckt sich mit dem in der Literatursichtung identifizierten Endenergieeinsparpotenzial in Höhe von 2–10 % (McKane und Hasanbeigi 2011; da Costa Bortoni 2009; Berger et al. 2005). Das Endenergieeinsparpotenzial von 0 % stellt sich in den Varianten ein, in denen eine kleinere Dimensionierung des jeweiligen Elektromotors nicht möglich ist.

5.4.3 Bewertungsverfahren

Zur vergleichenden Analyse der Einzelbewertung, der statisch-faktoriellen Bewertung und der integrierten Bewertung erfolgt die Definition von zwei Kennzahlen. Erstere beschreibt die prozentuale Abweichung ($\mu^{\text{ÖKO}}$) der durch die Einzelbewertung, die statisch-faktorielle Bewertung oder die integrierte Bewertung identifizierten ökonomisch optimierten jährlichen Gesamtkostenänderung für die 720 Varianten von der jeweils durch Exhaustionsmethode bestimmten optimalen jährlichen Gesamtkostenänderung. Diese Kennzahl quantifiziert die Güte der Bewertungsverfahren im Hinblick auf die ökonomische Optimierung. Als zweite Kennzahl wird das in den ökonomisch optimierten Varianten identifizierte Endenergieeinsparpotenzial mit denen in den ökonomisch optimalen Varianten verglichen (μ^{EEP}).

Tabelle 5-3 fasst die ermittelten Kennzahlen für die Einzelbewertung, die statisch-faktorielle Bewertung sowie die integrierte Bewertung zusammen. Durch die Einzelbewertung bzw. die statisch-faktorielle Bewertung wird in 139 respektive 159 der 720 Varianten das ökonomisch optimale System identifiziert. Dem stehen 535 Varianten für die Einzelbewertung und 378 Varianten für die statisch-faktorielle Bewertung gegenüber, in denen das ökonomische Potenzial überschätzt wird. Für die bewerteten Querschnittstechnologien kommt es somit sowohl durch die Einzelbewertung als auch durch die statisch-faktorielle Bewertung mehrheitlich zu einer Überschätzung des Endenergieeinsparpotenzials und infolgedessen zu einer Überschätzung der erzielbaren Kostenreduktion.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Variantenrechnungen für die Einzelbewertung, die statisch-faktorielle und die integrierte Bewertung

	$\mu^{\text{ÖKO}} > 0 \%$		$\mu^{\text{ÖKO}} \leq 0 \%$	
	$\mu^{\text{EEP}} > 0 \%$	$\mu^{\text{EEP}} \leq 0 \%$	$\mu^{\text{EEP}} > 0 \%$	$\mu^{\text{EEP}} \leq 0 \%$
Einzelbewertung	535	2	2	181 (139) ¹
Statisch-faktorielle Bewertung	378	1	9	332 (159) ¹
Integrierte Bewertung	0	0	2	718 (689) ¹

¹⁾ Der Zahlenwert in der Klammer entspricht der Anzahl an Systemen, in denen das optimale System identifiziert wurde. Es gilt: $\mu_{i,j}^{\text{ÖKO}} = 100 \% \wedge \mu_{i,j}^{\text{EEP}} = 100 \%$.

i Bewertungsmethode i mit $i \in \{\text{Einzelbewertung, statisch-faktorielle Bewertung, integrierte Bewertung}\}$
j Variante mit $j \in \mathbb{N} \{1, \dots, 720\}$

Bei der integrierten Bewertung wird das optimale System in 689 der 720 bewerteten Varianten identifiziert. In 29 Varianten wird das ökonomische Potenzial bei einer gleichzeitigen Unterschätzung des Endenergieeinsparpotenzials unterschätzt. Demgegenüber stehen zwei Varianten, in denen das ökonomische Potenzial unterschätzt wird, während das Endenergieeinsparpotenzial größer als im optimalen System ist. Dies deutet daraufhin, dass durch die integrierte Bewertung eher ein System identifiziert wird, das im Vergleich zum ökonomisch optimalen System eine (oder mehrere) Energieeffizienzmaßnahme(n) zu wenig umsetzt und dadurch sowohl das ökonomische Potenzial als auch das Endenergieeinsparpotenzial unterschätzt. Die

Anzahl der Varianten, in denen eine (oder mehrere) Energieeffizienzmaßnahme(n) umgesetzt werden, die nicht Teil des ökonomisch optimalen Systems sind, ist mit 2 von 720 sehr gering. Im Gegensatz zur Einzelbewertung sowie zur statisch-faktoriellen Bewertung führt die integrierte Bewertung somit eher zu einer Unterschätzung des ökonomischen Potenzials.

Abbildung 5-11 zeigt die Ergebnisse der 720 Variantenrechnungen in Form von Boxplots. Der Bereich $> 0\%$ stellt eine Überschätzung und der Bereich $< 0\%$ eine Unterschätzung des ökonomischen Potenzials dar. Die Einzelbewertung sowie die statisch-faktorielle Bewertung führen, gemessen am Median, zu einer Überschätzung des ökonomischen Potenzials. Dabei weist die Einzelbewertung einen mittleren methodischen Fehler⁵³ von 14,3 % und eine Fehlerhäufigkeit⁵⁴ von 80,4 % auf. Für die statisch-faktorielle Bewertung beträgt der mittlere methodische Fehler 5,0 % und die Fehlerhäufigkeit 77,9 %. Somit sind die Fehlerhäufigkeit der Einzelbewertung sowie die der statisch-faktoriellen Bewertung auf einem vergleichbaren Niveau, während der mittlere methodische Fehler der Einzelbewertung etwa um das Dreifach größer ist als bei der statisch-faktoriellen Bewertung. Im Gegensatz zur Einzelbewertung sowie zur statisch-faktoriellen Bewertung kommt es durch die integrierte Bewertung, gemessen am Median, zu keiner Abweichung vom ökonomischen Optimum. Der mittlere methodische Fehler beträgt $-0,02\%$ und die Fehlerhäufigkeit 4,3 %.

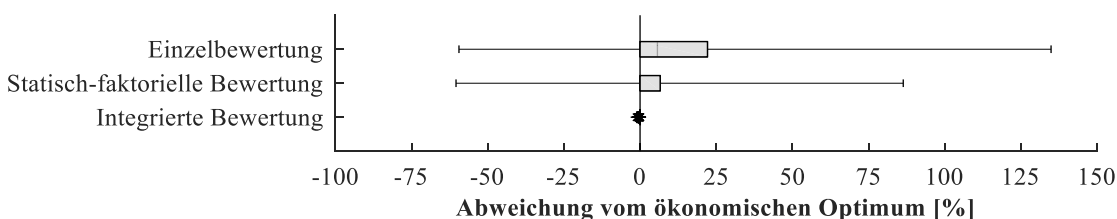


Abbildung 5-11: Boxplots der Variantenrechnungen für die Einzelbewertung, die statisch-faktorielle und die integrierte Bewertung

Abbildung 5-12 stellt die Ergebnisse der Parametervariation für die Einzelbewertung, die statisch-faktorielle Bewertung und die integrierte Bewertung als Histogramm dar. Dabei ist auf der Ordinate die Abweichung vom ökonomischen Optimum in $\pm 2,5\%$ -Intervallen aufgetragen. Im Rahmen der Einzelbewertung bzw. der statisch-faktoriellen Bewertung wird in 31,1 % respektive 54,7 % der 720 Varianten ein System mit einer Abweichung von $\pm 2,5\%$ vom ökonomischen Optimum identifiziert. Durch die integrierte Bewertung wird in 100 % der 720 bewerteten Varianten ein System mit einer Abweichung von $\pm 2,5\%$ vom ökonomischen Optimum identifiziert.

⁵³ Mittlerer Fehler: Mittelwert der berechneten Abweichungen vom ökonomisch optimalen System.

⁵⁴ Fehlerhäufigkeit: Quotient aus Anzahl der Systeme, in denen nicht das optimale System identifiziert wird, und Anzahl der berechneten Systeme.

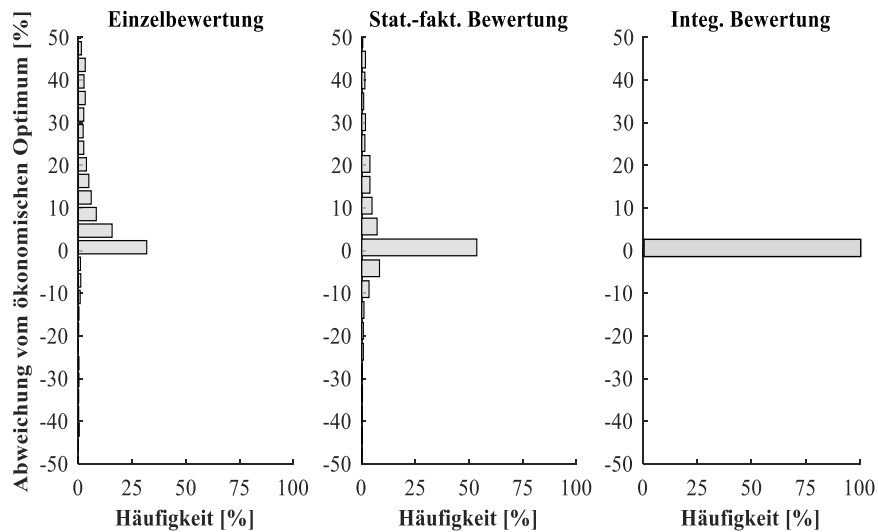


Abbildung 5-12: Histogramme der Variantenrechnungen für die Einzelbewertung (links), die statisch-faktorielle Bewertung (Mitte) sowie die integrierte Bewertung (rechts)

Die Ergebnisse der 720 durchgeführten Variantenrechnungen mit drei bis sechs interagierenden Energieeffizienzmaßnahmen zeigen, dass die integrierte Bewertung für die Bewertung der Energieeffizienzpotenziale von Querschnittstechnologien eine hohe Ergebnisgüte aufweist. Auch stellt die integrierte Bewertung im Vergleich zur Einzelbewertung sowie zur statisch-faktoriellen Bewertung mit Blick auf die Fehlerhäufigkeit und den mittleren methodischen Fehler bei der Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen eine Verbesserung dar. In den betrachteten 720 Variantenrechnungen wird die Fehlerhäufigkeit von 80,4 % bei der Einzelbewertung bzw. 77,9 % bei der statisch-faktorielle Bewertung auf 4,3 % bei der integrierten Bewertung reduziert. Gleichzeitig reduziert sich der mittlere methodische Fehler von 14,3 % bei der Einzelbewertung bzw. 5,0 % bei der statisch-faktorielle Bewertung auf -0,02 % bei der integrierten Bewertung. Mit Blick auf die Einzelbewertung von Energieeffizienzmaßnahmen wurde gezeigt, dass eine Vernachlässigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen zu signifikanten Fehlbewertungen führen kann. Auch wenn die quantitative Analyse im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich am Beispiel von Querschnittstechnologien erfolgt, ist dennoch davon auszugehen, dass ein Verzicht auf die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen auch für Prozesstechnologien zu fehlerhaften Potenzialanalysen führt. Um die Eignung der statisch-faktoriellen Bewertung zur Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen einzuordnen ist eine differenzierte Beurteilung erforderlich. Einerseits wurde beim Bewerten von Energieeffizienzmaßnahmen für Querschnittstechnologien ein vergleichsweise geringer mittlerer methodischer Fehler festgestellt. Somit scheint die statisch-faktorielle Bewertung zur aggregierten Analyse von durch eine gesteigerte Energieeffizienz induzierten Energieeinsparpotenzialen grundsätzlich geeignet. Andererseits zeigt die Abweichung auf Ebene einzelner Energieeffizienzmaßnahmen von über 50 %, dass

maßnahmenspezifische Aussagen zumindest kritisch zu hinterfragen sind. Gegenüber der Einzelbewertung und der statisch-faktoriellen Bewertung kann anhand der durchgeführten Variantenrechnungen gezeigt werden, dass die integrierte Bewertung eine Verbesserung im Hinblick auf die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen darstellt. So liefert die integrierte Bewertung sowohl auf aggregierter Ebene als auch auf Ebene einzelner Energieeffizienzmaßnahmen plausible Ergebnisse. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die quantitativen Analysen am Beispiel von Querschnittstechnologien für drei bis sechs interdependente Energieeffizienzmaßnahmen durchgeführt wurden. Dennoch ist davon auszugehen, dass die integrierte Bewertung auch bei mehr als sechs interdependenten Energieeffizienzmaßnahmen eine geringe Fehlerhäufigkeit, gepaart mit einem geringen mittleren methodischen Fehler aufweist. Ein quantitativer Nachweis ist aufgrund des hohen Rechenaufwands bei der vollständigen Enumeration aber nur begrenzt möglich. Zusammenfassend ist, auch im Hinblick auf die grundsätzliche Eignung und Notwendigkeit einer Heuristik zur adäquaten Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen, festzustellen, dass – solange die Hypothese $NP \neq P$ gilt und kombinatorische Optimierungsprobleme mit einer $O(n!)$ -Laufzeit zur Klasse der $NP-C$ (NP -vollständig) zählen⁵⁵ – die integrierte Bewertung eine Weiterentwicklung zum Stand der Forschung darstellt.

⁵⁵ Siehe Abschnitt 4.2.

6 Potenzialanalyse für Querschnittstechnologien in der Kunststoffverarbeitung

Anhand einer Szenarioanalyse werden nachfolgend bestehende Energieeffizienzpotenziale für Querschnittstechnologien am Fallbeispiel der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland analysiert. Dazu wird das in Kapitel 5 vorgestellte Energienachfragemodell angewandt. Ferner wird die Robustheit der Ergebnisse der Szenarioanalyse gegenüber Änderungen der Rahmenannahmen im Zuge einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

Als Fallbeispiel für die geplanten Analysen kämen neben der kunststoffverarbeitenden Industrie grundsätzlich die nichtenergieintensiven Industriebranchen infrage (bspw. Nahrungsmittelindustrie, Maschinenbau), da deren Endenergieverbrauch in der Regel durch Querschnittstechnologien dominiert wird (s. AGEB 2017; Bauernhansl 2014). Da dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) vier detaillierte Energieaudits aus der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland vorliegen, ist die Datengrundlage für die kunststoffverarbeitende Industrie deutlich besser als für andere nichtenergieintensive Industriebranchen. Daher erfolgt die Potenzialanalyse für Querschnittstechnologien im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland.

Kapitel 6 gliedert sich in vier Abschnitte. Die für das Verständnis dieser Arbeit relevanten Grundlagen der kunststoffverarbeitenden Industrie werden einleitend in Abschnitt 6.1 beschrieben. Anschließend erfolgt in Abschnitt 6.2 eine Dokumentation der relevanten Daten und Rahmenannahmen sowohl für die Szenarioanalyse als auch für die Sensitivitätsanalyse. Anschließend werden in Abschnitt 6.3 die Ergebnisse der Szenarioanalyse vorgestellt. Dies umfasst sowohl die identifizierten Energieeffizienzpotenziale nach Produktgruppen auf Basis von Typbetrieben als auch das Energieeffizienzpotenzial der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland (vgl. Ziel III, Abschnitt 1.2). Kapitel 6 schließt in Abschnitt 6.4 mit den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse.

6.1 Kunststoffverarbeitende Industrie

Abschnitt 6.1 dient zur Einführung in die für diese Arbeit relevanten Grundlagen der Kunststoffverarbeitung. Dies umfasst die Charakterisierung der Branche in Abschnitt 6.1.1 sowie die Beschreibung der wesentlichen Produktionsprozesse in Abschnitt 6.1.2. Abschließend erfolgt in Abschnitt 6.1.3 die Definition charakteristischer Typbetriebe für unterschiedliche Produktgruppen der kunststoffverarbeitenden Industrie (s. Abschnitt 5.1.1).

6.1.1 Charakterisierung der Branche

Die Abgrenzung der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland folgt der Klassifikation der Wirtschaftszweige (Statistisches Bundesamt 2008). Demnach umfasst die kunststoffverarbeitende Industrie im Sinne dieser Arbeit die Abteilung WZ 22.2 Herstellung von Kunststoffwaren. Auf 4-Steller-Ebene wird die Herstellung von Kunststoffwaren in vier Klassen untergliedert (s. Tabelle 6-1). Diese sind die Herstellung von Platten, Folien und Schläuchen (WZ 22.21), von Verpackungsmitteln (WZ 22.22), von Baubedarfsartikeln (WZ 22.23) sowie von sonstigen Kunststoffwaren (WZ 22.29). Im Jahr 2015 waren in der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland 314.911 Mitarbeiter in 2.499 Unternehmen beschäftigt (Statistisches Bundesamt 2017b). Dies entspricht durchschnittlich 126 Mitarbeitern pro Unternehmen. Ein Großteil der Unternehmen befindet sich in Familienbesitz (Dispan 2013). Etwa 92 % der Unternehmen haben weniger als 250 Mitarbeiter. Diese Unternehmen haben im Jahr 2015 einen Umsatz von 62,5 Mrd. EUR (\varnothing 25,0 Mio. EUR pro Unternehmen) generiert (Dispan 2013).⁵⁶ Somit ist die kunststoffverarbeitende Industrie nach quantitativen Kriterien eine mittelständisch geprägte Branche.⁵⁷ Die Kunststoffverarbeitung ist durch vier charakteristische Produktionsprozesse gekennzeichnet. Gemessen am Anteil des verarbeitenden Kunststoffgranulats in der EU sind dies die Extrusion (48,1 %), das Spritzgießen (27,6 %), das Blasformen (14,6 %) und das Thermoformen (3,4 %) (Dispan 2013). Diese Verfahren werden zur Produktion unterschiedlicher Produkte eingesetzt (Kurzbeschreibung s. Abschnitt 6.1.2). Die Güterproduktion betrug 2015 etwa 11.933 kt. Davon entfielen ca. 44,9 % auf die Herstellung von Platten, Folien und Schläuchen sowie 27,2 % auf die Herstellung von Verpackungsmitteln (s. Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Industrieanalyse der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland im Jahr 2015 (Unternehmen mit mehr als 20 Mitarbeitern)

Herstellung von...	WZ	Unternehmen ¹⁾	Betriebe ²⁾	Mitarbeiter ¹⁾	Umsatz ¹⁾	Produktion ³⁾
		Anzahl			Mio. EUR	1.000 t
Kunststoffwaren (gesamt)	22.2	2.499	2.865	314.911	62.475	11.933
Platten, Folien, ...	22.21	450	568	81.664	20.761	5.362
Verpackungsmittel	22.22	325	401	45.169	10.256	3.251
Baubedarfsartikel	22.23	445	495	41.999	7.457	1.051
sonst. Kunststoffwaren	22.29	1.279	1.401	146.079	24.002	2.269

¹⁾ Statistisches Bundesamt (2017b).

²⁾ Statistisches Bundesamt (2017a).

³⁾ Eigene Berechnung basierend auf Statistisches Bundesamt (2017e); s. Anhang A (Tabelle A-1, S. 171).

WZ Wirtschaftszweig

⁵⁶ Im Jahr 2016 ist der Umsatz um 3,6 % auf 64,8 Mrd. EUR angestiegen (Statistisches Bundesamt 2018b).

⁵⁷ Gemäß EU-Empfehlung 2003/361/EG gelten Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeitern und einem Umsatz \leq 50 Mio. EUR pro Jahr als kleine und mittlere Unternehmen (Europäische Kommission 2003).

Im Jahr 2015 war die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland für einen Endenergieverbrauch von 18,6 TWh (\cong 67,1 PJ) verantwortlich. Dabei ist elektrischer Strom mit einem Anteil von 62,7 % am Endenergieverbrauch der dominierende Energieträger. Weitere 24,4 % entfallen auf Erdgas, 4,0 % auf Wärme (fremdbezogen), 3,4 % auf Mineralöle und 5,5 % auf Kohlen und erneuerbare Energien (s. Tabelle 6-2). Kohlen werden in der kunststoffverarbeitenden Industrie lediglich in einem Betrieb eingesetzt (Wert ist geheim zu halten).

Tabelle 6-2: (Spezifischer) Endenergieverbrauch der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland im Jahr 2015

Herstellung von...	WZ	Endenergieverbrauch ¹⁾ [PJ]						SEC ⁵⁾ [kWh/kg]	
		Gesamt	Kohlen	Mineralöle	Gase	EE	Wärme El. Strom		
Kunststoffwaren (gesamt)	22.2	67,1	.	2,3	16,4	.	2,7	42,1	1,56
Platten, Folien, ...	22.21	29,3	. ²⁾	1,0	7,9	. ³⁾	1,8	15,5	1,52
Verpackungsmittel	22.22	13,1	-	0,4	1,7	. ⁴⁾	0,1	10,8	1,12
Baubedarfsartikel	22.23	4,1	-	0,3	1,7	0,3	-	1,8	1,09
sonst. Kunststoffwaren	22.29	20,6	-	0,8	5,0	0,1	0,7	14,0	2,52

¹⁾ Statistisches Bundesamt (2017c).

²⁾ Fallzahl = 1.

³⁾ Fallzahl = 9.

⁴⁾ Fallzahl = 5.

⁵⁾ Berechnung SEC: Endenergieverbrauch (Gesamt) dividiert durch Produktion (s. Tabelle 6-1, S. 90).

EE Erneuerbare Energien

SEC Spezifischer Endenergieverbrauch

WZ Wirtschaftszweig

. Zahlenwert geheim zu halten

- kein Wert

Der spezifische Endenergieverbrauch variiert auf Ebene der 4-Steller-Wirtschaftszweige zwischen 1,09 kWh/kg bei der Herstellung von Baubedarfsartikeln und 2,52 kWh/kg bei der Herstellung sonstiger Kunststoffwaren. Eine Erhebung in 165 Unternehmen der kunststoffverarbeitenden Industrie in Europa ergab einen durchschnittlichen spezifischen Endenergieverbrauch von 2,87 kWh/kg bei einer Bandbreite von 0,63 bis 6,20 kWh/kg in Abhängigkeit der eingesetzten Produktionsverfahren (RECIPE 2005).

6.1.2 Beschreibung der Produktionsprozesse

Im Folgenden wird eine Kurzbeschreibung der wesentlichen Produktionsprozesse in der kunststoffverarbeitenden Industrie gegeben. Dabei liegt der Schwerpunkt auf den für diese Arbeit relevanten Grundlagen. Für weiterführende Informationen zu den Produktionsprozessen sei auf entsprechende Literatur verwiesen (u. a. Greif et al. 2017; Hopmann et al. 2017; Bonten 2016; Bruder 2016; Hopmann und Michaeli 2015; Thielen et al. 2006; Johannaber 2004).

Rohr- und Profilextrusion

Der Aufbau einer Rohr- bzw. einer Profilextrusionslinie ist nahezu identisch und besteht aus fünf Verfahrensschritten: Extruder, Kalibriereinheit, Kühlstrecke, Abzugseinrichtung und Trennvorrichtung (Greif et al. 2017). Abbildung 6-1 zeigt den schematischen Aufbau einer Rohrextrusionslinie. Das Kunststoffgranulat wird dem Extruder über den Einfülltrichter zugeführt. Im Extruder wird das Granulat aufgeschmolzen und im Profilwerkzeug in Form gebracht. Anschließend wird das Rohr (bzw. die Stange) im Kalibrier- und Kühlstrecke in die gewünschte Form gebracht und unter Formzwang abgekühlt. In der Kalibriereinheit wird das schmelzflüssige Rohr bzw. das schmelzflüssige Profil mittels Vakuum an die Innenflächen des Kalibrators gesaugt. Das formstabile Rohr (bzw. die formstabile Stange) wird dem sich anschließenden Abzug und der Säge zugeführt. Die Säge schneidet die Rohre (bzw. Stangen) auf eine definierte Länge (Greif et al. 2017). Die Länge der Extrusionslinie wird wesentlich durch die Wanddicke und die Masse des Produkts sowie die Produktionsgeschwindigkeit determiniert. Mit zunehmendem Produktgewicht je Längeneinheit steigt die Länge der Kühlstrecke (Greif et al. 2017). Ein zu schnelles Abkühlen der Produkte ist aus Qualitätsgründen in der Regel nicht möglich, da es – insbesondere bei dickeren Produkten – zu Lunkerbildung kommen kann (Greif et al. 2017; Bonten 2016).

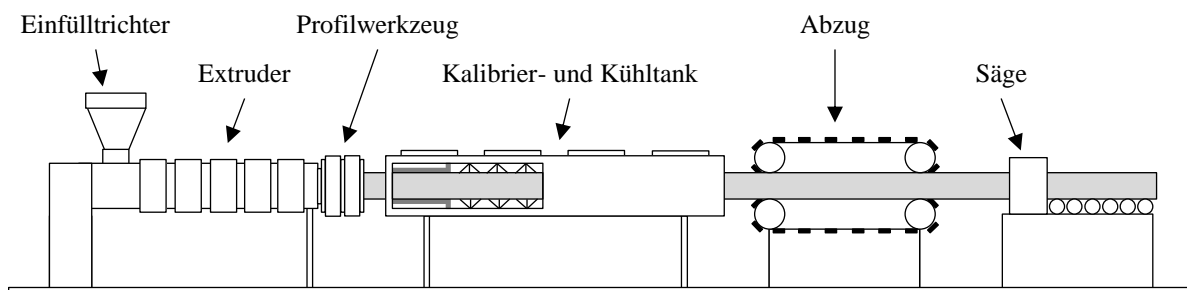


Abbildung 6-1: Rohrextrusion (Schema), eigene Abbildung basierend auf (Greif et al. 2017)

Folienextrusion

Eine typische Folienextrusionslinie besteht in der Regel aus sechs Verfahrensschritten: Extruder, Werkzeug, Abzugs- und Kühleinrichtung, Nachfolgeeinrichtungen und Wickler. Grundsätzlich wird zwischen Flach- und Blasfolienanlagen unterschieden (Greif et al. 2017). Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 zeigen den schematischen Aufbau einer Flachfolien- sowie einer Blasfolienanlage. Als erster Schritt wird das Kunststoffgranulat von den Lagerstätten zu den Extrusionslinien transportiert. Anschließend wird das Kunststoffgranulat in einem oder mehreren Extrudern plastifiziert und durch das Werkzeug in Form gebracht. Bei der Flachfolienextrusion (s. Abbildung 6-2) wird die Schmelze in eine flache Form gezogen (bzw. gepresst)

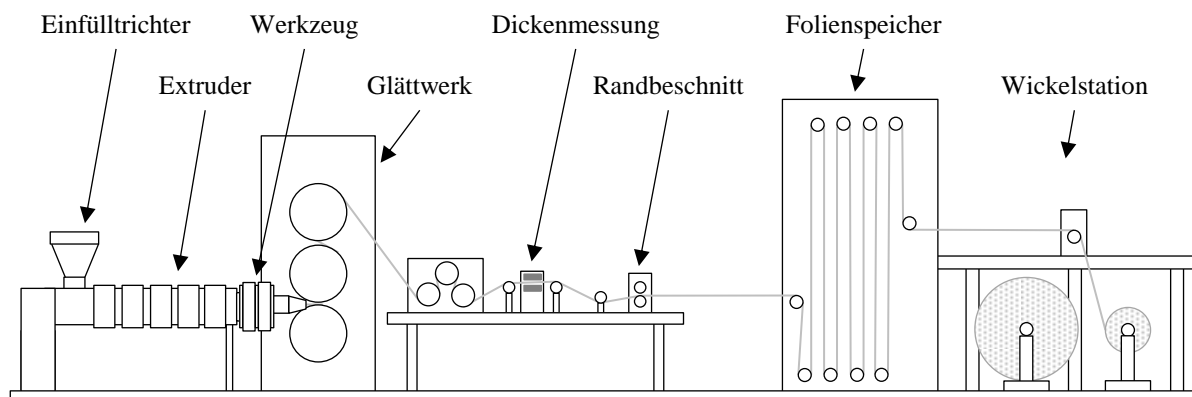


Abbildung 6-2: Flachfolienextrusion (Schema), eigene Abbildung basierend auf (Greif et al. 2017)

und geglättet. Es folgt eine Reihe von Abzugs- und Kühleinrichtungen, u. a. zur Dickenmessung sowie zum Randbeschnitt. Die Kühlung erfolgt bei der Flachfolienextrusion in der Regel durch Kühlwalzen. Die geglättete Folie durchläuft anschließend unterschiedliche Nachfolgeeinrichtungen, u. a. unterschiedliche Führungselemente, Schneideeinheiten sowie den Folienspeicher, und wird anschließend auf eine Rolle gewickelt (Greif et al. 2017).

Im Gegensatz zur Flachfolienextrusion wird die Schmelze bei der Blasfolienextrusion (s. Abbildung 6-3) zunächst in einem Blaskopf als Schlauch geformt. Die Kühlung der Folie erfolgt bei der Blasfolienextrusion durch Luftkühlung an der Innen- und Außenseite der Folie. Bevor die schlauchförmige Folie flachgelegt wird, finden analog zur Flachfolienextrusion eine Kalibrierung und eine Dickenmessung statt (Greif et al. 2017). Der Abzug der nun flachgelegten Folie erfolgt durch die Abzugeinheit. Es folgt die Bahnkantensteuerung sowie die Wicklung der Folie auf Rollen (Greif et al. 2017). Die Blasfolienextrusion eignet sich insbesondere zur Herstellung sehr dünner Folien (Bonten 2016).

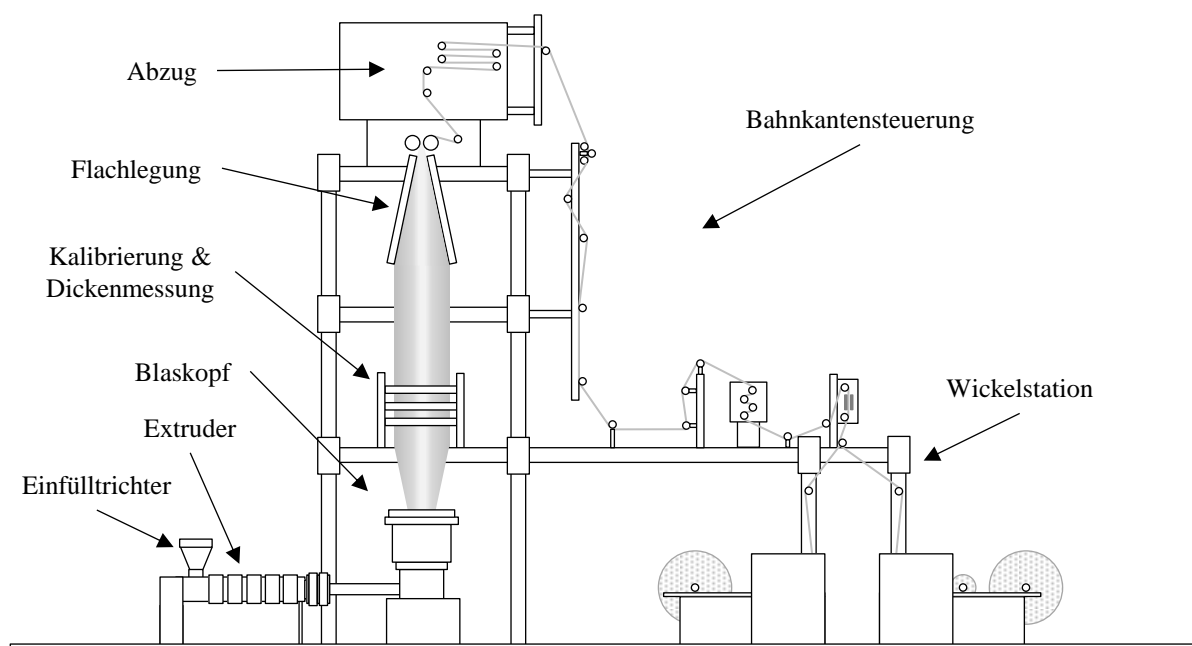


Abbildung 6-3: Blasfolienextrusion (Schema), eigene Abbildung basierend auf (NiBiS 2018)

Spritzgießen

Das Spritzgießen stellt einen diskontinuierlichen Prozess zur Herstellung von Formteilen variabler Größen und Geometrien aus Duro- und Thermoplasten dar. DIN 24 450 definiert Spritzgießmaschinen als „Maschinen, die aus vorzugsweise makromolekularen Formmassen diskontinuierlich Formteile herstell[en]“. Hopmann und Michaeli (2015) beschreiben fünf wesentliche Schritte des Spritzgießens (s. Abbildung 6-4). In der Plastifiziereinheit befindliche Kunststoffschmelze wird durch Schließen des Werkzeugs an die Spritzgussform gefahren und durch Axialvorschub der Schnecke in die Spritzgussform eingespritzt. Um Volumenschwindungen beim Abkühlen der Schmelze zu kompensieren, wird in der Nachdrückphase weitere Schmelze in die Form befördert. Im Anschluss an die Nachdrückphase wird durch Rotation der Schnecke die Schmelze für den nächsten Spritzzyklus erzeugt. Die Plastifikation erfolgt durch Dissipation innerhalb der Schnecke sowie Temperierung des Schneckenzyinders. Die Temperierung erfolgt in der Regel elektrisch. Abschließend öffnet das Werkzeug, sodass die Formteile ausgeworfen werden können (Hopmann et al. 2017; Hopmann und Michaeli 2015).

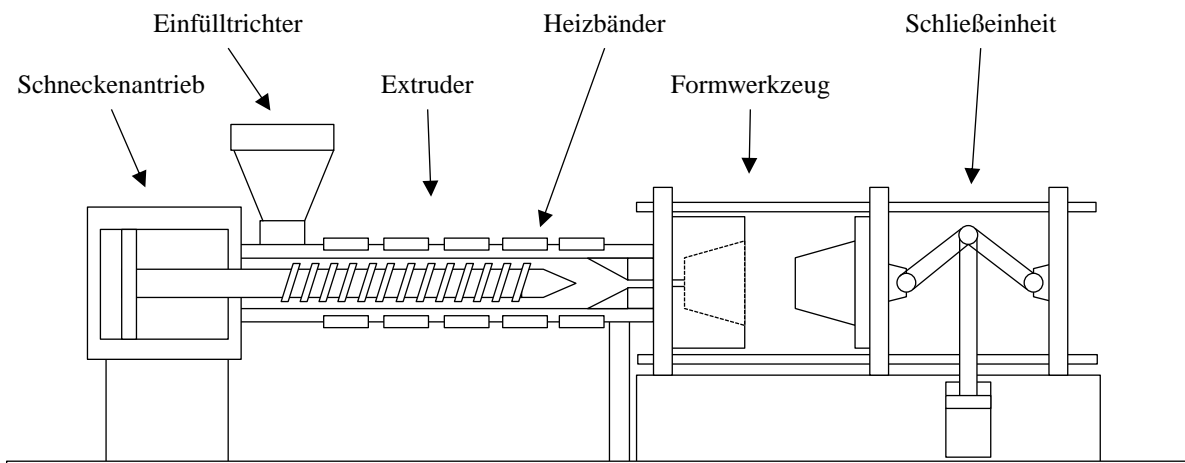


Abbildung 6-4: Spritzgießen (Schema), eigene Abbildung basierend auf (Hopmann und Michaeli 2015)

Blasformen

Zur Herstellung von Kunststoff-Hohlkörpern werden unterschiedliche Blasformverfahren eingesetzt. Zu den relevantesten Blasformverfahren zählen das Extrusions- und Streckblasformen (Thielen et al. 2006). Abbildung 6-5 zeigt den schematischen Ablauf des Extrusionsblasformens. Das Extrusionsblasformen wird mehrheitlich zur Herstellung von Hohlkörpern aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) eingesetzt (Thielen et al. 2006). Den ersten Schritt stellt das Plastifizieren des Kunststoffgranulats in einem Extruder dar. Die Kunststoffschmelze wird in einer Kombination aus Umlenkopf und Dorn in eine senkrechte, nach unten gerichtete Fließbewegung umgelenkt. Dabei entsteht der sogenannte Vorformling, der eine schlauchförmige

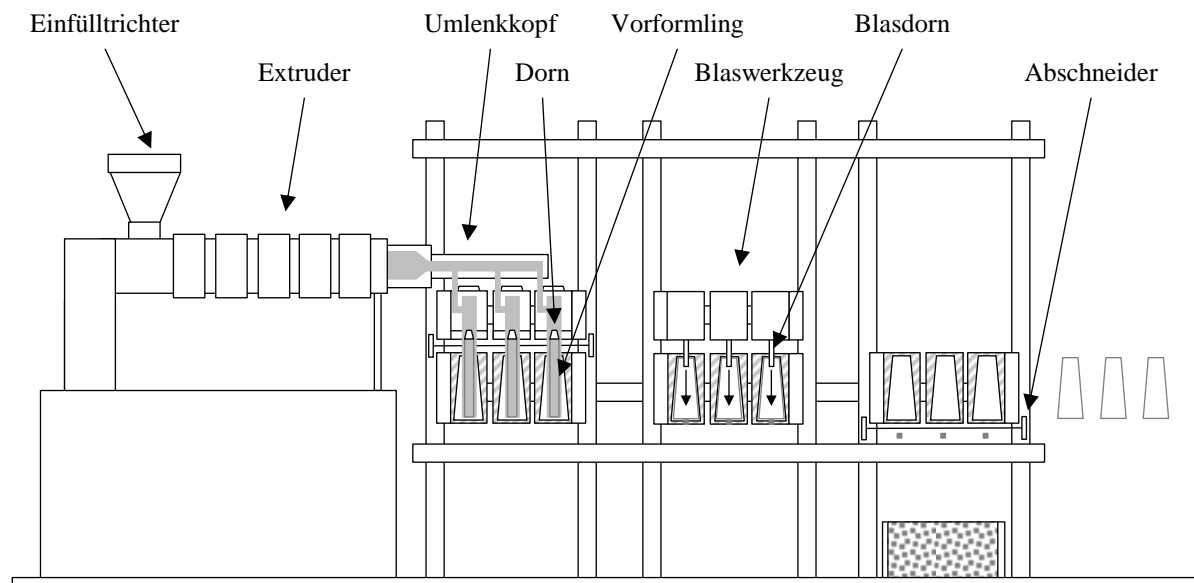


Abbildung 6-5: Extrusionsblasformen (Schema), eigene Abbildung basierend auf (Hopmann und Michaeli 2015)

Schmelze darstellt (Thielen et al. 2006). Um den sich ausbildenden Vorformling wird das Blaswerkzeug durch die Schließeinheit geschlossen. Dabei werden das obere und untere Ende des Vorformlings abgequetscht. Als nächster Schritt wird der Blasdorn in das Blaswerkzeug eingeschossen. Anschließend wird der Vorformling mittels Druckluft aufgeblasen und gegen die gekühlten Außenwände gedrückt. Dort erstarrt der Kunststoff und der Hohlkörper wird formstabil. Das Blaswerkzeug wird geöffnet und die Abfälle (beim Abquetschen des Vorformlings entstehende Bautzen) werden durch Abschneider vom hergestellten Hohlkörper abgetrennt (Thielen et al. 2006).

Das Streckblasformen wird insbesondere zur Herstellung von PET-Flaschen (Polyethylenterephthalat, PET) eingesetzt. Dabei dominiert das zweistufige Streckblasformen (Thielen et al. 2006). Die Herstellung der Hohlkörper erfolgt in zwei getrennten Prozessschritten. Der erste Schritt ist die Herstellung von Preforms im Spritzgießen und der zweite Schritt das eigentliche Streckblasen der Preforms. Abbildung 6-6 zeigt den schematischen Ablauf des Streckblasformens. Die Grundlagen des Spritzgießens wurden bereits zuvor beschrieben und werden im Folgenden nicht näher erläutert. Weiterführende anwendungsspezifische Informationen zum Herstellen von PET-Preforms sind in Thielen et al. (2006) dokumentiert. Den ersten Schritt des Streckblasformens stellt das Aufheizen der Preforms dar. Dieser Vorgang nimmt ca. 65 % der Zykluszeit des Streckblasens in Anspruch. Zum Aufheizen werden typischerweise elektrisch betriebene Strahlerkästen eingesetzt. Im Anschluss an das Aufheizen der Preforms erfolgt der eigentliche Verstreckprozess. Dazu wird – analog zum Extrusionsblasformen – zunächst eine Negativform des angestrebten Hohlkörpers um den Preform geschlossen. Durch Einführen einer Reckstange wird der aufgeheizte Preform zunächst mechanisch axial verstreckt, bis der Preform die Länge des gewünschten Hohlkörpers angenommen hat. Anschließend wird der Hohlkörper durch Druckluft (Blasdruck ca. 36 bar) aufgeblasen (Thielen et al. 2006). Analog

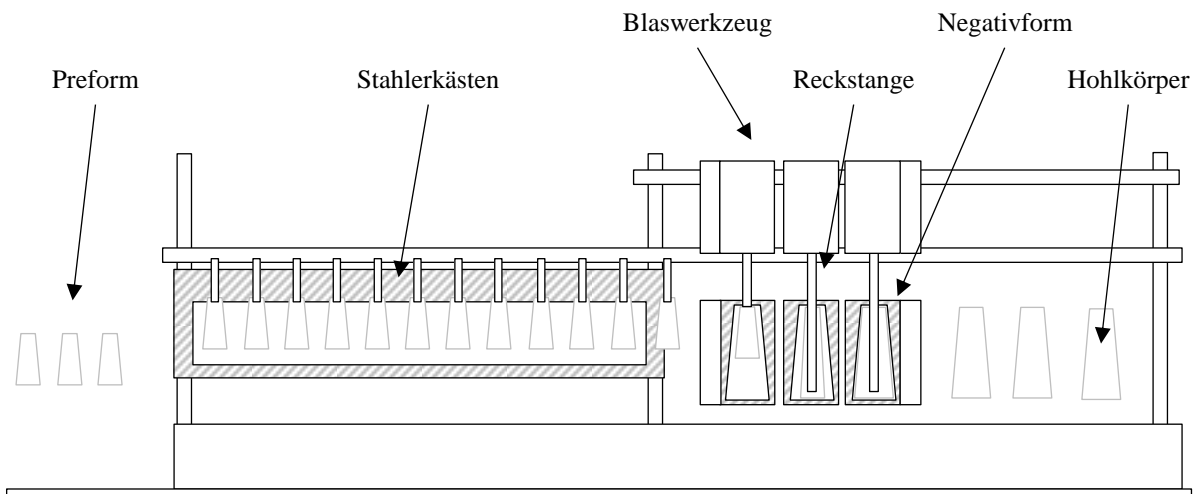


Abbildung 6-6: Streckblasformen (Schema)

zum Extrusionsblasformen erstarrt der Kunststoff unter Druckaufbringung an den gekühlten Wänden der Blasform. Abschließend wird die Blasform geöffnet und der hergestellte Hohlkörper verlässt die Blasformmaschine (Thielen et al. 2006).

Thermoformen

Eine typische Thermoformlinie besteht in der Regel aus den folgenden Verfahrensschritten: Heizen, Vorformen, Ausformen, Kühlen und Entformen (Illig 2016). Abbildung 6-7 zeigt den schematischen Aufbau einer Thermoformanlage. Als erster Schritt werden die Halbzeuge auf die erforderliche Verformungstemperatur erhitzt. Dies erfolgt typischerweise durch elektrisch betriebene Strahlungs-, Kontakt- oder Konvektionsheizungen. Im Anschluss an die Aufheizung erfolgt das Vorformen in der Formstation. Dies kann mittels Druckluft, durch Vakuum oder mechanisch erfolgen. Das vorgeformte Halbzeug wird anschließend mittels Druckluft,

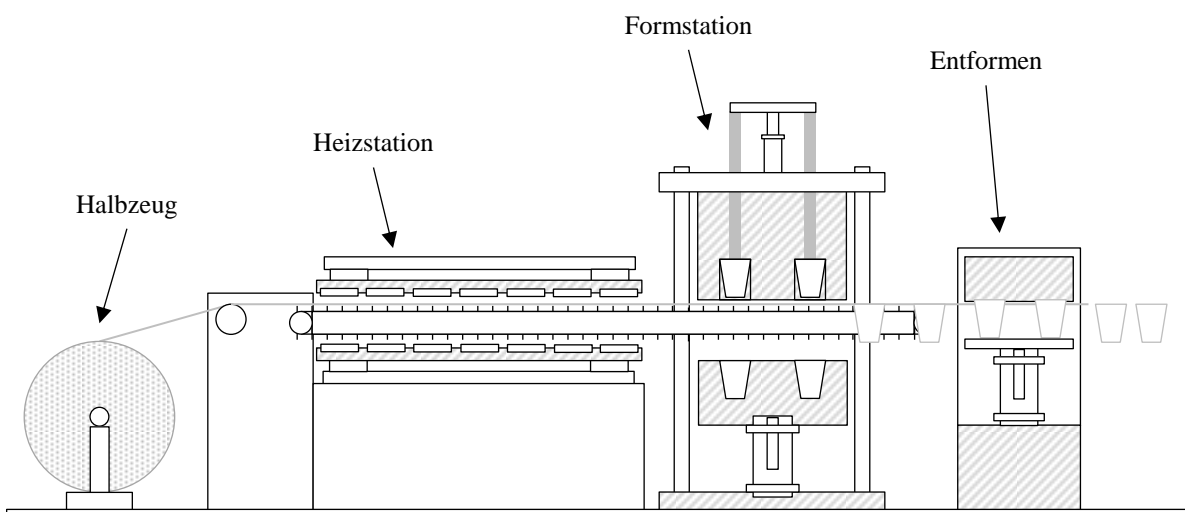


Abbildung 6-7: Thermoformen (Schema), eigene Abbildung basierend auf (Hopmann und Michaeli 2015)

Vakuum oder mechanisch ausgeformt. Für die Produktion von Verpackungsprodukten, die in großen Stückzahlen hergestellt werden (bspw. Becher), eignet sich die Druckluftausformung. Die Druckluftausformung erfolgt typischerweise aus dem Niederdrucknetz (6–8 bar), wobei in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie Ausformdrücke bis 200 bar erforderlich sind. Das ausgeformte Halbzeug wird gekühlt und anschließend entformt. Die Kühlung erfolgt wahlweise durch eine Kühlung des Formzeugs oder mittels Luftkühlung. Sobald das Halbzeug die Entformungstemperatur erreicht hat, kann es entformt werden (Illig 2016; Hopmann und Michaeli 2015). Erfolgt die Herstellung der eingesetzten Halbzeuge (Platten, Folien) im gleichen Unternehmen, so ist das innerbetriebliche Recycling der Verschnitte Stand der Technik. Werden die Halbzeuge fremdbezogen, nehmen die Lieferanten die entstehenden Kunststoffabfälle typischerweise zurück. Dies ist individuell mit dem Lieferanten zu verhandeln (Illig 2016).

6.1.3 Definition von Typbetrieben

Ausgangspunkt für die Charakterisierung und Parametrisierung der Typbetriebe ist eine strukturierte Datenrecherche. Diese basiert primär auf einer umfangreichen Literatursichtung. Die identifizierte Sekundärliteratur wird in Tabelle 6-3 entsprechend den drei Ebenen der Datenqualität nach Schüle et al. (2011) kategorisiert.

Ebene 1 umfasst Forschungsarbeiten und Berichte mit internationalem Fokus. Dazu zählt der Bericht ANALYSIS OF A SURVEY OF THE EUROPEAN PLASTICS PROCESSING INDUSTRY CONDUCTED FROM APRIL TO SEPTEMBER 2005. Im Rahmen einer Befragung von 165 überwiegend mittelständischen Unternehmen der kunststoffverarbeitenden Industrie (50–249 Mitarbeiter) wurden Daten zum spezifischen Endenergieverbrauch in Abhängigkeit der eingesetzten Produktionsprozesse, des Alters von Bestandsanlagen, der Kapazität und Auslastung von Fabriken, der eingesetzten Endenergieträger sowie der eingesetzten Technologien erhoben (RECIPE 2005).

Ebene 2 umfasst alle nationalen Forschungsarbeiten, Berichte und Makrostatistiken. So wurden im Rahmen der Studie BETEILIGUNGSORIENTIERTE VERBESSERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ IN DER KUNSTSTOFFINDUSTRIE der Sustain Consult (2013) 22 Experteninterviews in 14 Unternehmen der Kunststoffindustrie sowie eine schriftliche Befragung von 500 Beschäftigten in acht Betrieben jeweils zur Energie- und Ressourceneffizienz durchgeführt und ausgewertet.

Ebene 3 umfasst alle dokumentierten Energieaudits oder sonstige Forschungsarbeiten, die detaillierte Informationen auf Prozess- oder Einzelanlagenebene beinhalten. Dazu zählen beispielsweise die Ergebnisse von 22 Energieaudits aus der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland, die von Ökotec (2007) im Rahmen des Forschungsprojekts ENERGIEEFFIZIENZ IN DER MITTELSTÄNDISCHEN INDUSTRIE durchgeführt wurden. Ferner liegen dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) vier unveröffentlichte Energieaudits aus

durchgeführten Industrieprojekten vor. Diese umfassen u. a. Daten zur Gebäudestruktur sowie zum spezifischen Heizenergieverbrauch, zur produktspezifischen Dimensionierung von Anlagenkomponenten, zu den technologiespezifischen Steuerungs- und Regelungskonzepten, zum spezifischen Endenergieverbrauch sowie zu den eingesetzten Energieträgern.

Tabelle 6-3: Zusammenfassung ausgewählter Studien und Berichte zur Definition charakteristischer Typbetriebe

Studie/Bericht	Schwerpunkt	Umfang/Inhalte
Ebene 1	Urbanek und Saal (2011)	Deutschland, Italien
	RECIPE (2005)	EU-28 ¹⁾
	Puttinger (1997)	Österreich
Ebene 2	Statistisches Bundesamt (2017a, 2017b; 2017c)	Deutschland
	Consultic (2016)	Deutschland
	Weiß (2016)	Deutschland
	Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2014)	Deutschland
	Dispan (2013)	Deutschland
	Sustain Consult (2013)	Deutschland
	AGEB (2013)	Deutschland
	Trautmann et al. (2002)	Deutschland
	Interne Auditberichte ²⁾ (IER)	Deutschland
	Bertrand und Hervieu (2012)	Luxemburg
Ebene 3	Krajnc (2012)	Italien
	Ökotec (2007)	Deutschland

¹⁾ Hauptsächlich Deutschland (DE), Spanien (ESP), Vereinigtes Königreich Großbritannien (UK).

²⁾ Aus datenschutzrechtlichen Gründen ist die Publikation der internen Auditberichte nicht möglich.

S-SEC Standortspezifischer Endenergieverbrauch (engl. *site-specific energy consumption*)

P-SEC Produktspezifischer Endenergieverbrauch (engl. *product-specific energy consumption*)

M-SEC Maschinenspezifischer Endenergieverbrauch (engl. *machine-specific energy consumption*)

In acht der identifizierten Studien und Berichten (zzgl. der dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung vorliegenden Energieaudits) wurde eine Primärdatenerhebung durchgeführt (s. Tabelle 6-4).

Tabelle 6-4: Übersicht der Primärdatenerhebungen in der identifizierten Sekundärliteratur

Studie/Bericht	Erhebungsmethode	Umfang
Weiß (2016)	Unternehmensbefragung	76 Unternehmen (574 wurden befragt ¹⁾)
Urbanek und Saal (2011)	Unternehmensbefragung	78 Unternehmen ²⁾
RECIPE (2005)	Unternehmensbefragung	165 Unternehmen
Sustain Consult (2013)	Experteninterviews Schriftliche Mitarbeiterbefragung	22 Experten in 14 Unternehmen 500 Mitarbeiter in 8 Unternehmen
Interne Auditberichte (IER)	Energieaudits	4 Betriebe
Bertrand und Hervieu (2012)	Energieaudits	1 Betrieb
Krajnc (2012)	Energieaudits	1 Betrieb
Ökotec (2007)	Energieaudits	22 Betriebe
Puttinger (1997)	Pilotberatung	10 Betriebe

¹⁾ Befragungsschwerpunkt auf kleine und mittlere Unternehmen der kunststoffverarbeitenden Industrie in Nordrhein-Westfalen. Rücklaufquote der Unternehmensbefragung: 13,19 % (Weiß 2016).

²⁾ Verteilung der Unternehmen entsprechend den eingesetzten Prozesstechnologien: 35,9 % Spritzgießen, 32,1 % Extrusion, 21,8 % Blasformen und 10,3 % Thermoformen (Urbanek und Saal 2011).

Unter Verwendung der aufgeführten Datenquellen (s. Tabelle 6-3) werden charakteristische Typbetriebe definiert. Dazu erfolgt als erster Schritt eine Disaggregation der aus amtlichen Statistiken vorliegenden Branchendaten zum Endenergieverbrauch von 4-Steller-Ebene auf 6- bzw. 9-Steller-Ebene. Die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse sind in Anhang A (Tabelle A-1 bis Tabelle A-3, S. 171 ff.) dokumentiert. Anhand der produktbezogenen Daten werden einzelne Wirtschaftszweige mit vergleichbaren Produkten oder Produktgruppen auf 6- bzw. 9-Steller-Ebene zu charakteristischen Typbetrieben zusammengefasst. Das Ergebnis ist eine Aufschlüsselung in sechs Produktklassen (s. Tabelle 6-5).⁵⁸

Tabelle 6-5: Charakteristische Typbetriebe der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland

Abk.	Produkt/e	Betriebe ¹⁾	Produktion ²⁾	Produktion ³⁾	Produktionsprozesse
-	-	Anzahl	kt/a	t/a	-
Typ 1	Stangen, Rohre	144	1.023	7.106	Rohr- und Profilextrusion
Typ 2	Folien	213	2.126	9.983	Folienextrusion
Typ 3	Verpackungen	227	2.107	9.284	Spritzgießen, Blasformen, Thermoformen
Typ 4	Flaschen	47	328	6.982	Spritzgießen, Blasformen
Typ 5	Baubedarf	431	809	1.877	Spritzgießen, Profilextrusion
Typ 6	Technische Teile	1.145	1.891	1.651	Spritzgießen

¹⁾ Eigene Berechnung basierend auf Statistisches Bundesamt (2017a) sowie Tabelle A-5 (Anhang A, S. 175).

²⁾ Produktion aller Typbetriebe zur Herstellung eines Produkts. Eigene Berechnung basierend auf Tabelle A-2 (Anhang A, S. 172) sowie Tabelle A-5 (Anhang A, S. 175).

³⁾ Produktion eines Typbetriebs. Berechnung aus Produktion aller Typbetriebe und Anzahl der Betriebe.

Abk. Abkürzung/Kürzel

⁵⁸ Weiterführende Informationen sind in Anhang A (Tabelle A-5, S. 177) dokumentiert.

Der Typbetrieb 1 bildet beispielsweise 144 Betriebe aus den Wirtschaftszweigen WZ 22.21.10, 22.21.21 und 22.21.29 ab. Diese stellen Stäbe, Stangen und Rohre her.⁵⁹ Für die Herstellung werden Verfahren der Rohr- und Profilextrusion eingesetzt. Analog werden den weiteren Typbetrieben respektive Produkten die für die Produktion typischen Produktionsprozesse zugeordnet. So produziert etwa der Typbetrieb 6 technische Teile im Spritzgussverfahren (WZ 22.29.29 und 22.29.91). Anschließend werden anhand der vorliegenden Sekundärliteratur (s. Tabelle 6-3) und der Ergebnisse der vorliegenden Energieaudits für die charakteristischen Typbetriebe Produktionsprozesse definiert (s. Abschnitt 6.1.2). Zur Plausibilisierung werden die Charakteristika der Typbetriebe mit Branchenexperten diskutiert.

In Abhängigkeit der Produkte sowie der eingesetzten Produktionsprozesse werden unterschiedliche Kunststoffpolymere^{60,61,62} eingesetzt. Eine eindeutige Zuordnung der unterschiedlichen Kunststoffe zu den einzelnen Produkten ist nur für ausgewählte Wirtschaftszweige auf 9-Steller-Ebene möglich. Für einige der Produkte ist eine Zuordnung zum eingesetzten Kunststoff nicht möglich. Dies ist mitunter auf die große Anzahl unterschiedlicher Kunststoffpolymere zurückzuführen. In Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften werden die Kunststoffe zu unterschiedlichen Produkten verarbeitet und können durch unterschiedliche Verfahren bearbeitet werden. Aufgrund der mengenmäßigen Relevanz sind für die vorliegende Betrachtung insbesondere die Standardthermoplaste sowie die technischen Thermoplaste von Bedeutung. Für sechs der 16 Produkte der einzelnen Typbetriebe ist eine Zuordnung eines Kunststoffpolymers zu einem Produkt möglich (s. Tabelle A-5, S. 175). Für die übrigen zehn Produkte ist eine eindeutige Zuordnung eines Kunststoffpolymers anhand der Daten des statistischen Bundesamts nicht möglich. Daher werden diese zehn Produkte zunächst den vier Gruppen amorpher Standardthermoplast, amorpher technischer Thermoplast, teilkristalliner Standardthermoplast und teilkristalliner technischer Thermoplast zugeordnet. Für jede dieser vier Gruppen wird ein Kunststoffpolymer als charakteristischer Vertreter ausgewählt. Dieser dient als Referenz für die Modellparametrisierung. So wird beispielsweise Polyamid (PA) als Vertreter für die Gruppe der teilkristallinen technischen Thermoplaste verwendet. Die Zuordnung der Kunst-

⁵⁹ In der Wertschöpfungskette vorgelagerte Prozesse, also die Herstellung von Kunststoffgranulat und der Transport von selbigem zum Typbetrieb, sowie nachgelagerte Prozesse sind nicht Teil der Betrachtung.

⁶⁰ Kunststoffpolymere werden in Abhängigkeit ihrer Netzwerkstruktur in die Hauptgruppen Thermoplaste, Duromere und Elastomere (ugs. Gummi) unterteilt (Bonten 2016). Neben der Klassifizierung von Kunststoffpolymeren entsprechend ihrer Netzwerkstruktur erfolgt eine Differenzierung anhand der Sekundärstruktur. Hier wird im Wesentlichen zwischen amorphen Polymeren mit ungeordneten Strukturen und teilkristallinen Polymeren mit regelmäßigen Strukturen unterschieden. Ferner werden Thermoplaste entsprechend ihren Einsatzmöglichkeiten sowie den eingesetzten Mengen in Standardthermoplaste, technische Thermoplaste und Hochleistungsthermoplaste untergliedert (Bonten 2016).

⁶¹ Anhang A (Tabelle A-4, S. 165) bietet einen Überblick über ausgewählte Kunststoffpolymere sowie deren Verarbeitungsmöglichkeiten. Weiterführende Informationen liegen beispielsweise in Bonten (2016) vor.

⁶² Zusammenstellung der Stoffdaten basierend auf (Baine 2018; HeGo PolyForm 2018; Johannaber 2008; Osswald und Hernández-Ortiz 2006; Johannaber 2004; Yu und Sunderland 1992; Segler und Hutt 1979).

stoffpolymere zu den Produkten auf 9-Steller-Ebene der Wirtschaftszweige erfolgt unter Berücksichtigung der typischen Einsatzgebiete der Kunststoffpolymere (u. a. in Bonten 2016) sowie der in Deutschland eingesetzten Produktionsmengen der Kunststoffpolymere (s. Consultic 2016). Die Zuordnung der Kunststoffpolymere zu den Produkten ist in Anhang A (Tabelle A-5, S. 175) dokumentiert.

6.2 Daten und Rahmenannahmen

Im Folgenden werden die den geplanten Analysen zugrunde liegenden Daten und Rahmenannahmen dokumentiert. Dabei erfolgt in Abschnitt 6.2.1 zunächst eine Definition der Szenarien für die Analyse der Energieeffizienzpotenziale. Anschließend werden in Abschnitt 6.2.2 die im Zuge der Sensitivitätsanalyse durchgeführten Einzelparametervariationen dokumentiert.

6.2.1 Definition der Szenarien

Für die Bewertung der Energieeffizienzpotenziale in der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland wird eine Szenarioanalyse durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf den durch von Reibnitz (1992) entwickelten Szenarioansatz zurückgegriffen. Dieser Ansatz unterscheidet zwischen zwei Extrem- und einem Referenz- bzw. Trendszenario (Mietzner 2009). Das Trendszenario beschreibt dabei die Fortführung der gegenwärtigen Situation. Dieses Szenario wird um ein negatives und ein positives Extremszenario ergänzt (engl. *best- and worst-case-scenario*), die einerseits ein ‚Horror-Szenario‘ und andererseits ein ‚Wunschszenario‘ darstellen (Mietzner 2009).

Definition des Trendszenarios

Die techno-ökonomische Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen erfolgt für das Basisjahr 2015 mit dem Euro als Währung (EUR₂₀₁₅). Wesentliche Determinanten der Wirtschaftlichkeitsbewertung sind die Energieträgerpreise und Energieträgerpreisentwicklung, die durch Multiplikation mit den Endenergieeinsparungen in eine jährliche monetäre Einsparung überführt werden, sowie der zur Diskontierung zukünftiger Einsparungen verwendete kalkulatorische Zinssatz. Die Robustheit der Ergebnisse gegenüber den getroffenen Annahmen wird im Zuge der Sensitivitätsanalyse bewertet (s. Abschnitt 6.4).

Der Endenergieverbrauch der kunststoffverarbeitenden Industrie wird wesentlich durch die Endenergeträger elektrischer Strom und Erdgas bestimmt. Neben den vorherrschenden **Energieträgerpreisen** im Basisjahr wird die Wirtschaftlichkeit einer Energieeffizienzmaßnahme durch die Entwicklung der Energieträgerpreise über den Betrachtungszeitraum beeinflusst. Grundlage für die Energieträgerpreise im Basisjahr 2015 sind die Ergebnisse aus dem Refe-

renzscenario der Energiereferenzprognose in Schlesinger et al. (2014) sowie die daraus abgeleiteten Preise in Bubeck (2017). Für die **Entwicklung der Energieträgerpreise** wird ein jährlicher Anstieg um 0,25 %/a, bezogen auf das Vorjahr, angenommen. Die Herleitung orientiert sich an der in Schlesinger et al. (2014) dokumentierten Entwicklung der Energieträgerpreise. In Anhang B (Tabelle B-11, S. 185) ist die Energieträgerpreisentwicklungen im Trendszenario für den Zeitraum von 2015 bis 2035 dargestellt. Die Energieträgerpreise folgen einer betriebswirtschaftlichen Betrachtung und enthalten somit alle Steuern und Abgaben exklusive der Mehrwertsteuer (Brunke 2017).

Die Auswahl eines **kalkulatorischen Zinssatzes** zur ökonomischen Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen folgt dem Prinzip der gewichteten Kapitalkosten (engl. *weighted average cost of capital*, WACC). Dies spiegelt eine betriebswirtschaftliche Bewertung aus Sicht der Industrieunternehmen wider. Neben dem Finanzierungsverhältnis (Eigen- und Fremdkapital) werden weitere Faktoren wie die Eigenkapitalrendite sowie Investitionsrisiken berücksichtigt (Konstantin 2017). Brunke (2017) hat im Rahmen einer Literaturlauswertung zur Auswahl eines kalkulatorischen Zinssatzes bei der Bewertung von Energieeffizienz- und CO₂-Vermeidungsmaßnahmen einen plausiblen Wertebereich von 3 bis 30 % festgestellt. Als Basisannahme für das Trendszenario wird entsprechend den Ausführungen in Brunke (2017) und Beer et al. (2009) ein kalkulatorischer Zinssatz von 15 % gewählt. Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen an die Eigenkapitalrendite sowie Abweichungen bei der Bewertung von Investitionsrisiken ist die Wahl eines kalkulatorischen Zinssatzes mit Unsicherheiten behaftet. Daher wird der Einfluss des gewählten kalkulatorischen Zinssatzes auf die Ergebnisse im Rahmen der Sensitivitätsanalyse bewertet (s. Abschnitt 6.4).

Definition der Extremszenarien

Die Definition der Extremszenarien verfolgt das Ziel, die mit der zukünftigen Entwicklung verbundenen Unsicherheiten, bspw. zur Entwicklung der Energieträgerpreise, zu berücksichtigen. Mietzner (2009) hebt mit Blick auf die Definition der Extremszenarien hervor, dass diese einen möglichen (Zukunfts-)Zustand beschreiben, der „zwar unwahrscheinlich, aber niemals unmöglich sein darf.“ Wesentliche Deskriptoren für die Extremszenarien sind die Energieträgerpreise sowie die Energieträgerpreisentwicklung, der kalkulatorische Zinssatz sowie die Effizienz des Technologiebestands und die damit verbundenen Anwendungspotenziale der Energieeffizienzmaßnahmen.

Tabelle 6-6 fasst ausgewählte Annahmen der Szenarien zusammen.

Tabelle 6-6: Zusammenfassung der wesentlichen Parameter für die Szenarioanalyse

	Einheit	Szenario		
		Negativ	Trend	Positiv
Kalkulatorischer Zinssatz ¹⁾	%	30,00	15,00	10,00
Strompreis ^{2),3)}	EUR-ct ₂₀₁₅ /kWh	9,10	12,13	15,16
Gaspreis ^{2),3)}	EUR-ct ₂₀₁₅ /kWh	2,29	3,05	3,81
Heizöl ^{2),3)}	EUR-ct ₂₀₁₅ /kWh	4,12	5,50	6,87
Biomasse ^{2),3)}	EUR-ct ₂₀₁₅ /kWh	1,62	2,16	2,70
Energieträgerpreisanstieg ⁴⁾	%/a	0,00	0,25	1,00

¹⁾ Brunke (2017) und Beer et al. (2009).
²⁾ Eigene Berechnungen basierend auf Bubeck (2017) in Anlehnung an Schlesinger et al. (2014).
³⁾ Energieträgerpreise im Startjahr 2015.
⁴⁾ Herleitung der durchschnittlichen Energieträgerpreisentwicklung aus der Entwicklung der Energieträgerpreise in der Energiereferenzprognose (Schlesinger et al. 2014).

Das **negative Extremszenario** beschreibt einen (Zukunfts-)Zustand, in dem die vorherrschenden Rahmenbedingungen die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erschweren. Konkret bedeutet dies niedrige Energieträgerpreise im Basisjahr gepaart mit einem geringeren Anstieg der Energieträgerpreise über den Betrachtungszeitraum im Vergleich zum Trendszenario. Zudem spiegeln sich hohe Wirtschaftlichkeitsanforderungen der Industrieunternehmen in einem hohen kalkulatorischen Zinssatz wider. Auch das Anwendungspotenzial der Energieeffizienzmaßnahmen ist im Vergleich zum Trendszenario reduziert. Im negativen Extremszenario werden für das Basisjahr jeweils 25 % niedrigere Energieträgerpreise als im Trendszenario unterstellt. Mit Blick auf die Entwicklung der Energieträgerpreise wird angenommen, dass diese über den Betrachtungszeitraum konstant sind. Ferner wird ein kalkulatorischer Zins von 30 % definiert. Bezogen auf das Anwendungspotenzial wird die Annahme getroffen, dass der Anteil der im Bestand befindlichen Motorsysteme der Effizienzklasse ‚Hoch‘ von ca. 5 % auf ca. 8 % ansteigt. Gleichzeitig steigt die Durchdringung drehzahl geregelter Motorsysteme von ca. 15 % im Trendszenario auf ca. 20 %. Mit Blick auf die Beleuchtung wird von einem Anstieg der im Bestand befindlichen Lampen der Effizienzklasse ‚Hoch‘ und ‚BVT‘ ausgegangen.⁶³

Im Gegensatz zum negativen Extremszenario beschreibt das **positive Extremszenario** einen (Zukunfts-)Zustand, in dem die vorherrschenden Rahmenbedingungen die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen unter ökonomischen Gesichtspunkten anreizen. Dies zeigt sich in höheren Energieträgerpreisen im Basisjahr, einem größeren Energieträgerpreisanstieg über den Betrachtungszeitraum im Vergleich zum Trendszenario, vergleichsweise niedrigen Wirtschaftlichkeitsanforderungen der Industrieunternehmen sowie einem hohen Anwendungspotenzial

⁶³ Vgl. Dokumentation des Technologiebestands im Trendszenario Anhang B (Tabelle B-1, S. 171).

der Energieeffizienzmaßnahmen. Im Basisjahr übersteigen die Energieträgerpreise die des Trendszenarios um 25 %. Es wird von einem jährlichen Anstieg der Energieträgerpreise um 1,0 % ausgegangen. Der kalkulatorische Zinssatz wird mit 10 % bemessen. Bezogen auf das Anwendungspotenzial wird die Annahme getroffen, dass der Anteil der im Bestand befindlichen Motorensysteme der Effizienzategorie ‚Hoch‘ von durchschnittlich ca. 5 % auf 0 % abfällt. Gleichzeitig sinkt die Durchdringung drehzahl geregelter Motorensysteme von ca. 15 % im Trendszenario auf ca. 10 %. Analog wird für die Beleuchtung von einer Reduktion der im Bestand befindlichen Lampen der Effizienzategorie ‚Hoch‘ und ‚BVT‘ ausgegangen.

6.2.2 Rahmenannahmen der Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse erfolgt eine Bewertung der Robustheit der Ergebnisse der Potenzialanalyse gegenüber Unsicherheiten in der Parameterdefinition. Im Gegensatz zu den definierten Extremszenarien erfolgt im Rahmen der Sensitivitätsanalyse eine Einzelparametervariation. Die Parameterauswahl orientiert sich dabei an den größten zu erwartenden Abweichungen. Unter dieser Prämisse werden – in Anlehnung an Brunke (2017), Brunke und Blesl (2014a, 2014b) und Fleiter et al. (2012) – die Energieträgerpreise, die Entwicklung der Energieträgerpreise sowie der kalkulatorische Zinssatz ceteris paribus variiert. Als Referenz der Sensitivitätsanalyse dienen die Annahmen des Trendszenarios (s. Abschnitt 6.2.1). Tabelle 6-7 fasst die Annahmen der Sensitivitätsanalyse zusammen.

Tabelle 6-7: Zusammenfassung der Parameter für die Sensitivitätsanalyse

	Einheit	Parametervariationen ¹⁾		
		- 25 %	Trend	+ 25 %
Kalkulatorischer Zinssatz	%	11,25	15,00	18,75
Strompreis	EUR-ct ₂₀₁₅ /kWh	9,10	12,13	15,16
Gaspreis	EUR-ct ₂₀₁₅ /kWh	2,29	3,05	3,81
Heizöl	EUR-ct ₂₀₁₅ /kWh	4,13	5,50	6,88
Biomasse	EUR-ct ₂₀₁₅ /kWh	1,62	2,16	2,70
Energieträgerpreisentwicklung	%/a	0,19	0,25	0,31

¹⁾ Die Herleitung der Parameter erfolgt anhand der Annahmen im Trendszenario (s. Tabelle 6-6, S. 103).

Für die Sensitivitätsanalyse erfolgt eine Variation der genannten Parameter um ± 25 %. Für die Energieträgerpreise erfolgt die Variation im Basisjahr 2015 bei gleicher zukünftiger Entwicklung (Parallelverschiebung). Somit werden die Strom- und Gaspreise in einem Wertebereich von 9,10 bis 15,16 EUR-ct₂₀₁₅/kWh bzw. 2,29 bis 3,81 EUR-ct₂₀₁₅/kWh variiert (jeweils im Basisjahr). Die Variation der Energieträgerpreisentwicklung erfolgt auf Basis der Energieträgerpreisentwicklung des Trendszenarios für das Basisjahr 2015. Dabei wird das jährliche Wachstum jeweils um 25 % gesteigert bzw. reduziert. Der kalkulatorische Zinssatz wird in einem Wertebereich von 11,25 bis 18,75 % variiert.

6.3 Energieeffizienzpotenziale

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Szenarioanalyse dargestellt. Dabei erfolgt in Abschnitt 6.3.1 zunächst eine Beschreibung der Energieeffizienzpotenziale für Querschnittstechnologien nach Produktgruppen in der Kunststoffverarbeitung auf Basis von Typbetrieben. Anschließend werden in Abschnitt 6.3.2 die Energieeffizienzpotenziale für Querschnittstechnologien auf die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland extrapoliert.

6.3.1 Potenziale nach Produktgruppen auf Basis von Typbetrieben

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Potenzialanalyse für die unterschiedlichen Produktgruppen auf Basis von Typbetrieben dargestellt. Der Aufbau der Ergebnisbeschreibung folgt für alle betrachteten Typbetriebe dem gleichen Muster und lässt sich in vier thematische Bereiche aufgliedern:

- Zunächst erfolgen eine Kurzbeschreibung der Produktionsprozesse der Typbetriebe⁶⁴ sowie eine Darstellung der wesentlichen Standortkennzahlen. Dazu zählen unter anderem der absolute und spezifische Endenergieverbrauch (S-SEC), die Aufschlüsselung der eingesetzten Energieträger sowie der spezifische Heizenergieverbrauch. Dabei ist zu berücksichtigen, dass keine vollständige Erfassung aller Verbraucher eines Typbetriebs vorliegt. Die Angaben beziehen sich ausschließlich auf die erfassten Verbraucher und sind somit geringer als der Endenergieverbrauch eines realen Betriebs.
- Anschließend werden die identifizierten Endenergieeinsparpotenziale⁶⁵ in Form von Energieeinsparkostenkurven jeweils für das Trendszenario dargestellt. Dabei wird zwischen dem wirtschaftlichen und dem technischen Endenergieeinsparpotenzial differenziert. Die identifizierten Endenergieeinsparpotenziale werden in die Bereiche Motorsysteme (Elektromotor-, Pumpen-, Ventilatoren-, Druckluftsysteme), Prozess- und Klimakälte, Raumwärme und Beleuchtung untergliedert.
- Darauf aufbauend werden für jeden Typbetrieb ausgewählte Energieeffizienzmaßnahmen vorgestellt. Eine umfassende Dokumentation der Ergebnisse erfolgt in Anhang C (Tabelle C-1 bis Tabelle C-4, S. 190 ff.). Weiterführende Ergebnisse zum positiven und negativen Extremszenario werden in Abschnitt 6.3.2 vorgestellt und sind ebenfalls in Anhang C (Tabelle C-5 bis Tabelle C-12, S. 198 ff.) zusammengefasst.

⁶⁴ Die für das Verständnis dieser Arbeit erforderlichen Grundlagen der wesentlichen in der kunststoffverarbeitenden Industrie eingesetzten Produktionsprozesse sind in Kapitel 5.4 und in Anhang A zusammengefasst.

⁶⁵ Wird in den Abschnitten 6.2.2 und 6.3.2 von technischen oder wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzialen gesprochen, so sind diese – falls nicht anders erläutert – immer auf eine gesteigerte Endenergieeffizienz zurückzuführen.

- Abschließend wird der Einfluss von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen beschrieben. Hier wird jeweils ein Vergleich zu den Ergebnissen der Einzelbewertung, d. h. zur individuellen Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungen, durchgeführt.

Eine vergleichende Analyse der Ergebnisse für die untersuchten Produkte bzw. Typbetriebe erfolgt in Abschnitt 6.3.2. Dabei werden sowohl die Ergebnisse im Trendszenario als auch die Ergebnisse im positiven und negativen Extremszenario dargelegt.

Typbetrieb 1: Stäbe, Stangen und Rohre

Der Typbetrieb 1 bildet einen Standort zur Produktion von Stäben, Stangen und Rohren ab. Die jährliche Güterproduktion beträgt 7.106 t und verteilt sich zu 56,5 % auf die Herstellung von Stäben aus Polyvinylchlorid (PVC) sowie zu 43,5 % auf die Herstellung unterschiedlicher Rohre aus den Polymeren Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP). Es erfolgt eine Produktion im Dreischichtbetrieb an fünf Wochentagen. Der jährliche Endenergieverbrauch beträgt im Trendszenario 9.636,9 MWh. Davon entfallen 54,7 % auf elektrischen Strom und 45,3 % auf Erdgas. Dies entspricht einem spezifischen Endenergieverbrauch von 1,36 kWh/kg. Die Produktion erfolgt auf insgesamt elf Extrusionslinien. Davon werden acht zur Produktion der PVC-Stäbe und drei zur Produktion der unterschiedlichen PE- und PP-Rohre eingesetzt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Zwei zentrale Kältemaschinen versorgen die Kalibrier- und Kühleinheit der unterschiedlichen Rohr- und Profilextrusionslinien mit Prozesskälte. Die Druckluftversorgung erfolgt durch drei in Kaskade betriebene Druckluftkompressoren ohne Drehzahlregelung aus einem zentralen Druckluftnetz. Die Produktionshalle wird während der gesamten Produktionszeit belüftet und bei Bedarf beheizt. Zum Einsatz kommt eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Die Beheizung erfolgt durch zentrale Heizkessel. Der spezifische Heizenergieverbrauch beträgt 157,41 kWh/m². Mit 71,1 % sind die Motorensysteme die größten Stromverbraucher. Weitere 12,1 % des Stromverbrauchs entfallen auf die Beleuchtung. Abbildung 6-8 zeigt die Energieeinsparpotenzialkurve für den Typbetrieb 1 im Trendszenario. Das technische Endenergieeinsparpotenzial beträgt 2.082,2 MWh bzw. 21,6 % und das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial 1.498,1 MWh bzw. 15,5 %, jeweils bezogen auf den Endenergieverbrauch im Basisjahr 2015. Damit sind 71,9 % des identifizierten technischen Endenergieeinsparpotenzials wirtschaftlich. Mit 44,0 % entfällt der Großteil des identifizierten wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials im Trendszenario auf den Bereich Motorensysteme. Weitere 31,6 % sind der Raumwärme, 13,8 % der Beleuchtung und 10,7 % der Prozess- und Klimakälte zuzuordnen.

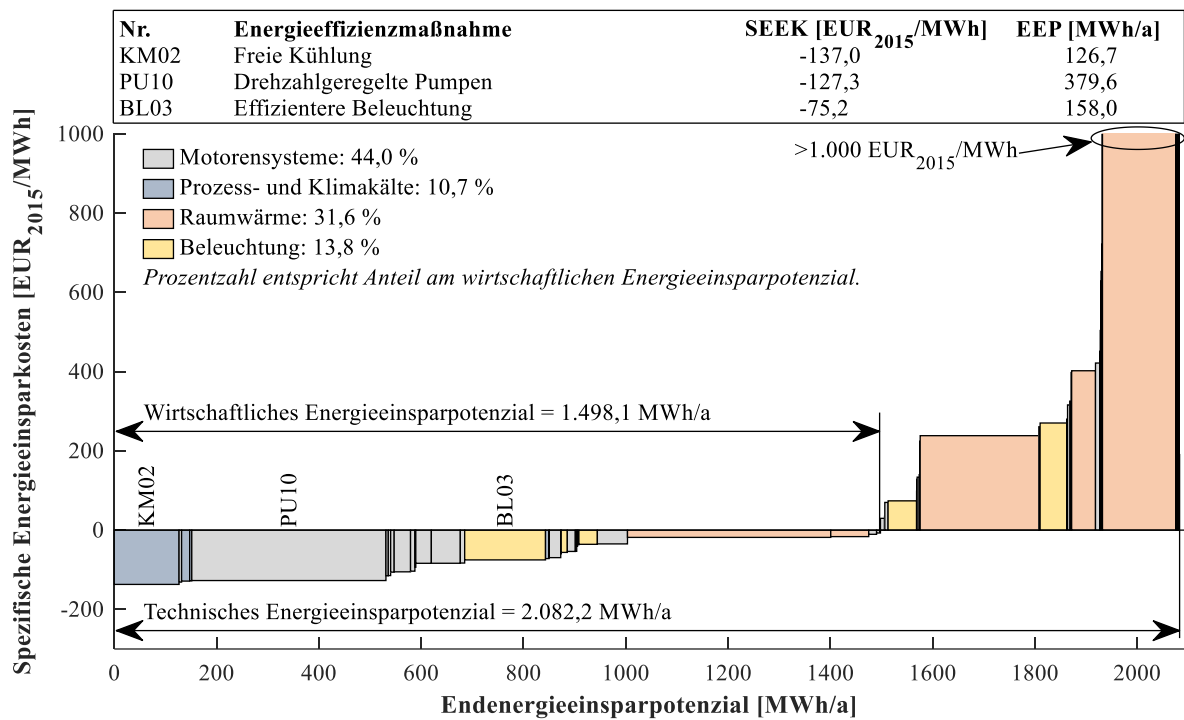


Abbildung 6-8: Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 1 zur Herstellung von Stäben, Stangen und Rohren im Extrusionsverfahren in Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario, mit SEEK (spezifische Energieeinsparkosten) und EEP (Endenergieeinsparpotenzial)

Etwa 379,6 MWh bzw. 25,3 % des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials entfallen auf den Einsatz drehzahleregelter Pumpen (PU10) an der Kalibriereinheit. Hier wird das Kunststoffrohr durch ein der Außenkontur gleichendes Werkzeug gezogen und mittels Vakuum an das Werkzeug gepresst. Hierbei wird das Rohr gekühlt und schlussendlich formstabil (vgl. Abschnitt 6.1.2). Während beim Anfahren einer Extrusionslinie ein vergleichsweise großer Saugvolumenstrom erforderlich ist, reduziert sich dieser, sobald das Rohr durch das Werkzeug hindurchgezogen wurde, aufgrund der dann geringeren Spaltweite zwischen Werkzeug und Bauteil auf ca. 30 % (Speck Pumpen 2013, 2011). Die gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten betragen -127,3 EUR₂₀₁₅/MWh. Neben dem Einsatz drehzahleregelter Pumpen sind unter anderem die freie Kühlung (KM02) sowie der Einsatz einer effizienteren Beleuchtung (BL03) wirtschaftlich realisierbar. Die freie Kühlung führt zu einer Endenergieeinsparung von 126,7 MWh bei spezifischen Energieeinsparkosten von -137,0 EUR₂₀₁₅/MWh. Der Einsatz einer effizienteren Beleuchtung reduziert den Endenergieverbrauch um 158,0 MWh bei spezifischen Energieeinsparkosten in Höhe von -75,2 EUR₂₀₁₅/MWh.

Durch die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen kommt es im Vergleich zur Einzelbewertung zu einer Reduktion des technischen und wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials. Das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial reduziert sich im Bereich der Motorensysteme durch die Berücksichtigung von Wechselwirkungen um durchschnittlich 30,9 %. Der größte Einfluss besteht im Bereich der Raumwärme sowie

der Kopplung der Kälte- und Wärmeversorgung. Die Energieeffizienzsteigerungen in der Produktion führen zu einer Reduktion der inneren Lasten in der Produktionshalle und damit zu einem Anstieg des Endenergiebedarfs der Hallenheizung um 5,5 %. Der zusätzliche Endenergiebedarf der Hallenheizung wird wiederum durch eine Nutzung der verfügbaren Abwärme der Kältemaschine überkompensiert, obgleich sich die verfügbare Abwärme durch die Optimierung der Kälteversorgung um 10,9 % reduziert. Insgesamt reduziert sich das technische Endenergieeinsparpotenzial durch die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen um 753,9 MWh bzw. 26,6 % und das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial um 493,0 MWh bzw. 24,8 %, jeweils im Vergleich zur Einzelbewertung.

Typbetrieb 2: Folien

Der Typbetrieb 2 charakterisiert einen Standort zur Produktion von Folien unterschiedlicher Dicken. Jährlich werden 9.983 t Folie aus den Polymeren Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) hergestellt. Die Produktion erfolgt fünf Tage pro Woche im Zweischichtbetrieb. Der jährliche Stromverbrauch beträgt im Trendszenario 6.902,1 MWh. Weitere 4.634,6 MWh Erdgas werden im Trendszenario zu Heizzwecken eingesetzt. Dies führt zu einem spezifischen Endenergieverbrauch von 1,16 kWh/kg. Die Herstellung der unterschiedlichen Folien erfolgt mittels Blasfolien- und Flachfolienextrusion auf zehn Extrusionslinien. Die Förderung des Kunststoffgranulats zu den unterschiedlichen Extrusionslinien erfolgt mit druckluftbetriebenen Vakuumfördersystemen. Neben der Förderung des Kunststoffgranulats wird Druckluft auch zur Steuerung der Andrückrollen (engl. *pinch-rolls*) bei der Blasfolienextrusion eingesetzt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Das bestehende Druckluftnetz wird durch einen Grund- und einen Spitzenlastkompressor (jeweils ohne Drehzahlregelung) bedient. Die Kälteversorgung der Extrusionslinien erfolgt über zwei zentrale Kältemaschinen. Eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung sorgt für einen konstanten Luftwechsel in der Produktionshalle. Bei Bedarf wird die Zuluft beheizt. Mit 71,1 % sind die Motorensysteme die größten Stromverbraucher. Auf die Beleuchtung entfallen 4,2 % und auf die Prozess- und Klimakälte 5,9 % des Stromverbrauchs. Der spezifische Heizenergieverbrauch beträgt 164,74 kWh/m². Abbildung 6-9 zeigt die Energieeinsparpotenzialkurve für den Typbetrieb 2 im Trendszenario. Das technische Endenergieeinsparpotenzial beträgt 2.140,8 MWh bzw. 18,6 % und das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial 1.250,3 MWh bzw. 10,8 %, jeweils bezogen auf den Endenergieverbrauch im Basisjahr 2015. Das identifizierte wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial teilt sich im Trendszenario zu 48,1 % auf den Bereich Motorensysteme, 32,6 % auf die Raumwärme, 14,3 % auf die Prozess- und Klimakälte sowie 5,0 % auf die Beleuchtung auf. Der Großteil des unwirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials entfällt auf die Energieeffizienzmaßnahmen Gebäudedämmung (HT01) und den Einsatz einer effizienteren Heizung (HT07) im Bereich der Raumwärme.

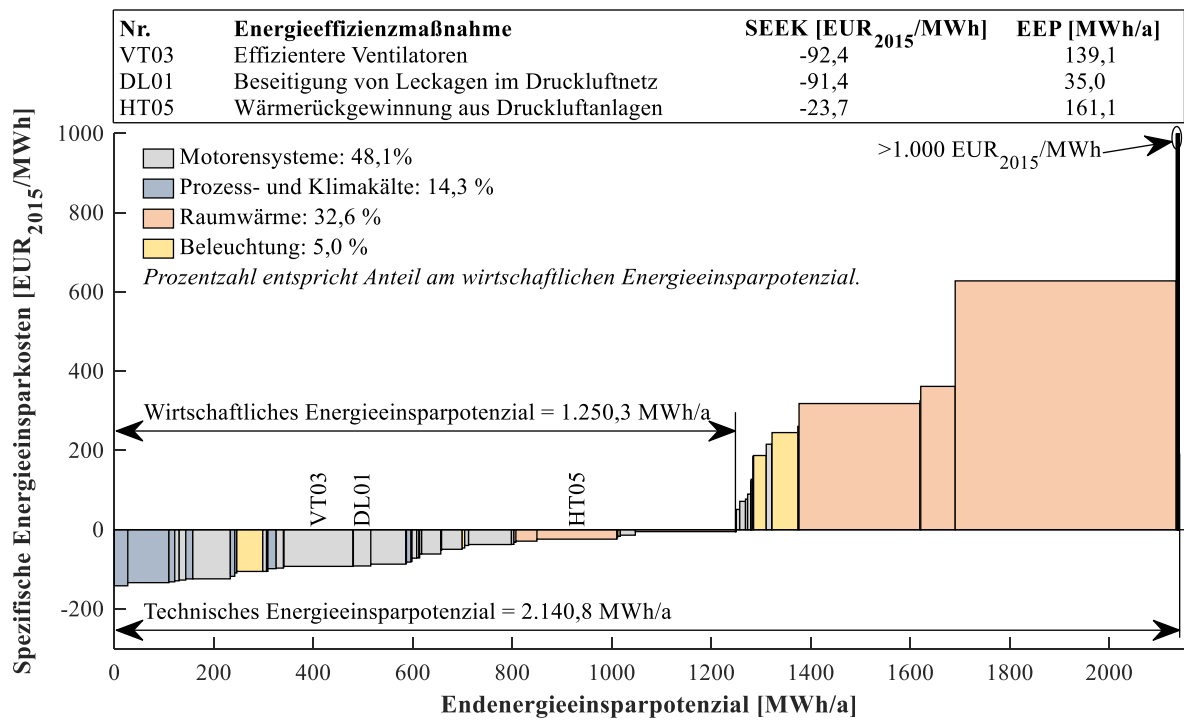


Abbildung 6-9: Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 2 zur Herstellung von Folien durch Schlauch- und Flachfolienextrusion in Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario, mit SEEK (spezifische Energieeinsparkosten) und EEP (Endenergieeinsparpotenzial)

Im Trendszenario erfolgt die Druckluftversorgung durch zwei Kompressoren mit An-/Ausregelung. Abbildung 6-10 zeigt den Druckluftbedarf (oben), den Netzdruck (Mitte) sowie den Einsatz der Kompressoren (unten) exemplarisch für ein zwölfminütiges Bedarfsprofil. Der Druckluftbedarf wird im Ausgangssystem von einem Grund- und einem Spitzenlastkompressor gedeckt. Das Schaltverhalten beider Kompressoren wird über einen minimalen und maximalen Schaltdruck definiert. Die Kompressoren starten, sobald der jeweilige Einschaltdruck erreicht ist, und werden in den Leerlauf geschaltet, sobald der Netzdruck den jeweiligen Ausschalt- druck erreicht. In den ersten 208 Sekunden wird der Druckluftbedarf durch den Kompressor 1 gedeckt, die kurzzeitige Spitzenlast wird durch den Druckluftspeicher ausgeglichen. Anschließend wechselt der Kompressor 1 in den Leerlaufbetrieb, da der Ausschalt- druck des Kompressors 1 von 9,1 bar(ü) erreicht ist. Nach 261 Sekunden ist der Netzdruck auf den Einschalt- druck des Kompressors 1 von 7,85 bar(ü) gesunken, sodass dieser aus dem Leerlauf in den Betrieb wechselt. Nach 358 Sekunden schaltet auch der Kompressor 2 ein, da der Netzdruck trotz des Betriebs des Kompressors 1 auf 7,60 bar(ü) gesunken ist. Nach 427 Sekunden wird der Aus- schalt- druck des Kompressors 2 von 8,85 bar(ü) erreicht, sodass dieser zunächst in den Leerlauf schaltet. Der Ausschalt- druck des Kompressors 1 von 9,10 bar(ü) wird nach 462 Sekunden er- reicht, sodass auch dieser in den Leerlauf schaltet. Nach der eigentlichen Betriebszeit werden die Kompressoren zunächst im Leerlauf weiterbetrieben, um die zulässigen Motorschaltspiele nicht zu überschreiten. Der Druckluftbedarf wird nun aus dem Speicher bedient, bis der Ein-

schaltdruck des Kompressors 1 von 7,85 bar(ü) unterschritten wird. Während der Kompressor 1 nach 523 Sekunden wieder in Volllast betrieben wird, schaltet der Kompressor 2 nach 665 Sekunden aus. Im Trendszenario kann der Endenergieverbrauch der Druckluftversorgung durch die Umsetzung der wirtschaftlichen Energieeffizienzmaßnahmen um 27,9 % reduziert werden. Dabei ist u. a. das Beseitigen von Leckagen im Druckluftnetz (DL01) mit spezifischen Energieeinsparkosten in Höhe von -91,4 EUR₂₀₁₅/MWh wirtschaftlich realisierbar. Das Endenergieeinsparpotenzial durch die Beseitigung von Leckagen beträgt 35,0 MWh bzw. 9,8 %. Weitere 44,9 MWh bzw. 12,6 % können durch den Einsatz effizienterer Kompressoren (DL06) in Kombination mit einer Drehzahlregelung (DL13) eingespart werden.

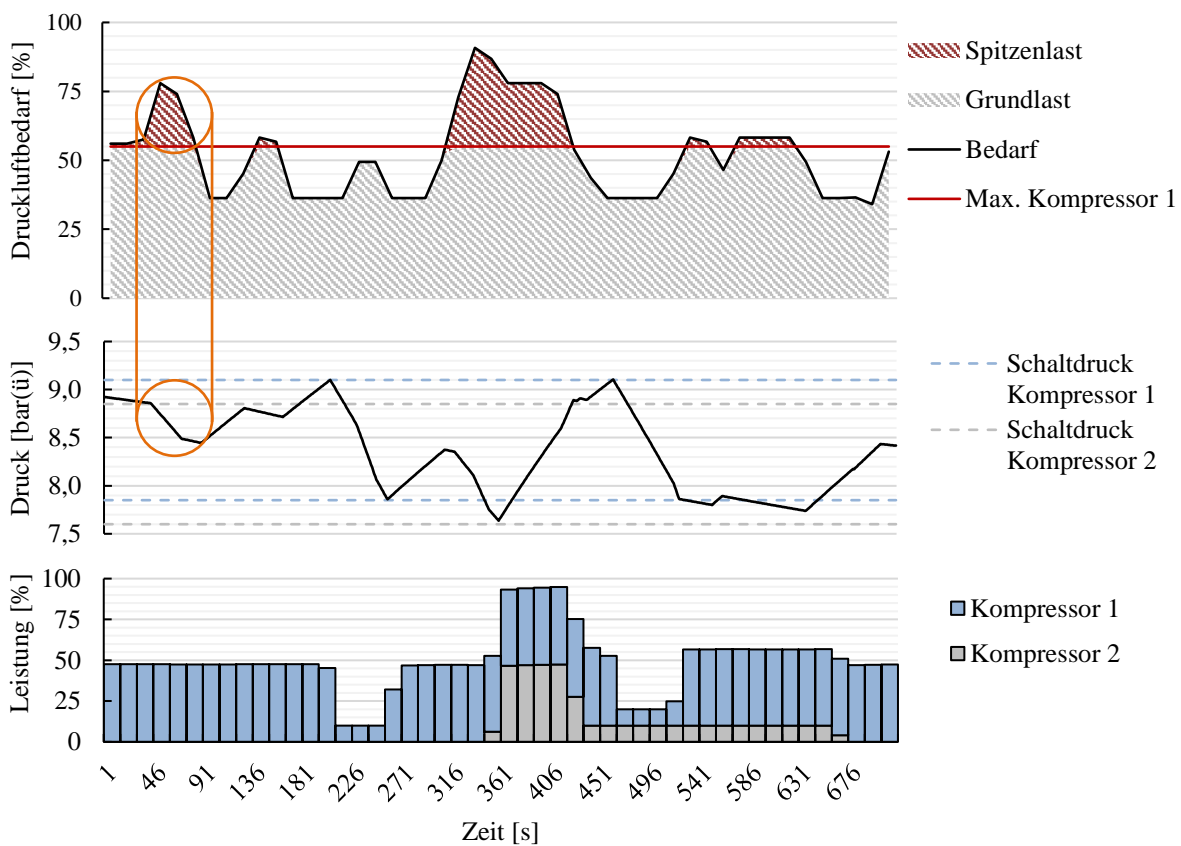


Abbildung 6-10: Einsatz der An-/Ausregelung am Beispiel eines zwölfminütigen Bedarfsprofils (48 aggregierte 15-Sekunden-Intervalle) für den Typbetrieb 2 im Trendszenario

Neben der Optimierung der Druckluftversorgung können durch den Einsatz effizienterer Ventilatoren (VT01) Endenergieeinsparungen von 139,1 MWh zu spezifischen Energieeinsparkosten von -92,4 EUR₂₀₁₅/MWh realisiert werden. Dies entspricht einer Reduktion des Endenergieverbrauchs der betroffenen Ventilatoren um 13,5 %. Ventilatoren werden u. a. im Bereich der Blasfolienextrusion für die Kühlung des Folienschlauchs und in der Lüftung eingesetzt.

Durch die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen kommt es im Vergleich zur Einzelbewertung zu einer Reduktion des technischen Endenergie-

einsparpotenzials um 609,4 MWh bzw. 22,2 % und des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials um 487,9 MWh bzw. 28,1 %. Beispielsweise verringert sich durch die Optimierung der Druckluftversorgung die verfügbare Abwärme, sodass das Endenergieeinsparpotenzial durch die Wärmerückgewinnung im Vergleich zur Einzelbewertung um 18,0 % reduziert wird. In nächster Instanz bewirkt der Einsatz einer Wärmerückgewinnung aus Druckluftkompressoren (DL01) eine Reduktion des Endenergieeinsparpotenzials einer effizienteren Heizung (HT07) um 52,4 % gegenüber der Einzelbewertung. Infolgedessen steigen die mittleren spezifischen Energieeinsparkosten der effizienteren Heizung (HT07) von 286,1 auf 318,5 EUR₂₀₁₅/MWh. Im Bereich der Motorensysteme führen Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen zu einer Reduktion des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials um durchschnittlich 31,9 % gegenüber der Einzelbewertung.

Typbetrieb 3: Verpackungen

Der Typbetrieb 3 stellt einen Standort zur Produktion unterschiedlicher Verpackungsprodukte dar. Die jährliche Güterproduktion beträgt 9.284 t. Davon entfallen 27,8 % auf die Produktion von Kunststoffbechern sowie 72,2 % auf die Produktion von Fässern und den dazugehörigen Deckeln. Die Produktion erfolgt an sechs Wochentagen im Zweischichtbetrieb. Der jährliche Endenergieverbrauch beträgt im Trendszenario 8.754,9 MWh, wobei 81,5 % auf elektrischen Strom und 18,5 % auf Erdgas entfallen. Dies führt zu einem spezifischen Endenergieverbrauch von 0,94 kWh/kg. Die Produktion der Kunststoffbecher erfolgt auf neun Thermoformanlagen mit Druckluftformung. Zur Produktion der Fässer und Deckel werden zwölf Extrusionsblasformanlagen sowie sieben Spritzgussanlagen eingesetzt. Beim Spritzguss entstehende Angüsse und beim Extrusionsblasformen anfallende Bautzen werden in Beistellmühlen recycelt. Das entstehende Mahlgut wird dem neuwertigen Kunststoffgranulat beigemischt. Die beim Thermoformen eingesetzten Folien werden fremdbezogen, anfallende Abfälle (bspw. Randbeschnitte) werden im Gegensatz zu den Spritzgussangüssen nicht dem innerbetrieblichen Stoffrecycling zugeführt, sondern extern recycelt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Die Versorgung der Produktionslinien mit Prozesskälte erfolgt über drei zentrale Kältemaschinen. Das Druckluftnetz wird von drei in Kaskade betriebenen Kompressoren bedient. Die Produktionshalle wird durch eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung belüftet und bei Bedarf beheizt bzw. durch eine Teilklimaanlage klimatisiert. Der spezifische Heizenergieverbrauch beträgt 122,75 kWh/m². Abbildung 6-11 zeigt die Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 3 im Trendszenario. Das technische Endenergieeinsparpotenzial beträgt 1.499,4 MWh bzw. 17,1 % und das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial 1.142,3 MWh bzw. 13,1 %, jeweils bezogen auf den Endenergieverbrauch im Basisjahr 2015. Das ökonomische Endenergieeinsparpotenzial teilt sich zu 39,3 % auf die Motorensysteme, 38,8 % auf die Raumwärme, 16,7 % auf die Prozess- und Klimakälte und 5,2 % auf die Beleuchtung auf.

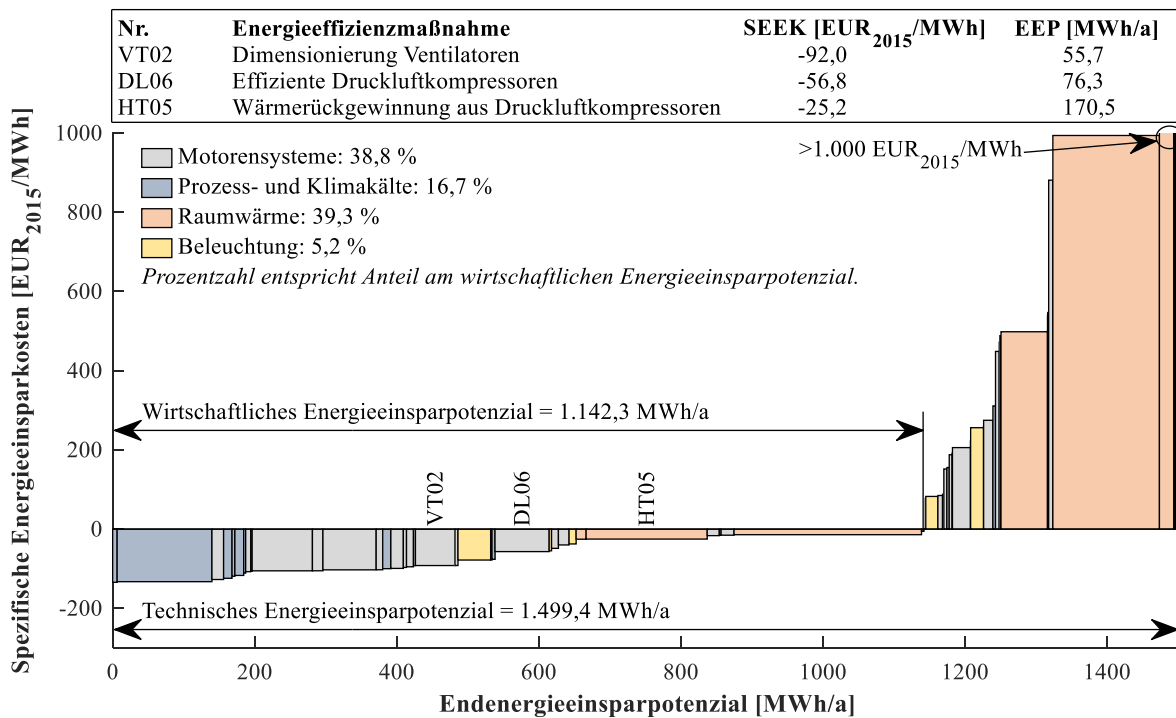


Abbildung 6-11: Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 3 zur Herstellung von Verpackungen durch Thermoformen, Spritzguss und Extrusionsblasformen in Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario, mit SEEK (spezifische Energieeinsparkosten) und EEP (Endenergieeinsparpotenzial)

Die Wärmerückgewinnung aus den Druckluftkompressoren (HT05) stellt eine der Energieeffizienzmaßnahmen mit dem größten Endenergieeinsparpotenzial dar. Der Endenergieverbrauch der Bürogebäudeheizung wird um 170,5 MWh bzw. 67,1 % reduziert. Die spezifischen Energieeinsparkosten betragen -25,2 EUR₂₀₁₅/MWh. Abbildung 6-12 zeigt exemplarisch die Nutzung der verfügbaren Abwärme der Druckluftkompressoren zur Raumwärmebereitstellung für die Kalenderwoche 1. Die Gebäudebeheizung beginnt werktags in den frühen Morgenstunden, um zum Arbeitsbeginn die geforderte Raumtemperatur zu gewährleisten. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Abwärme aus der Produktion verfügbar ist, stellt ein Pufferspeicher die notwendige Wärme bereit. Mit Beginn der Produktion wird der Raumwärmebedarf vollständig

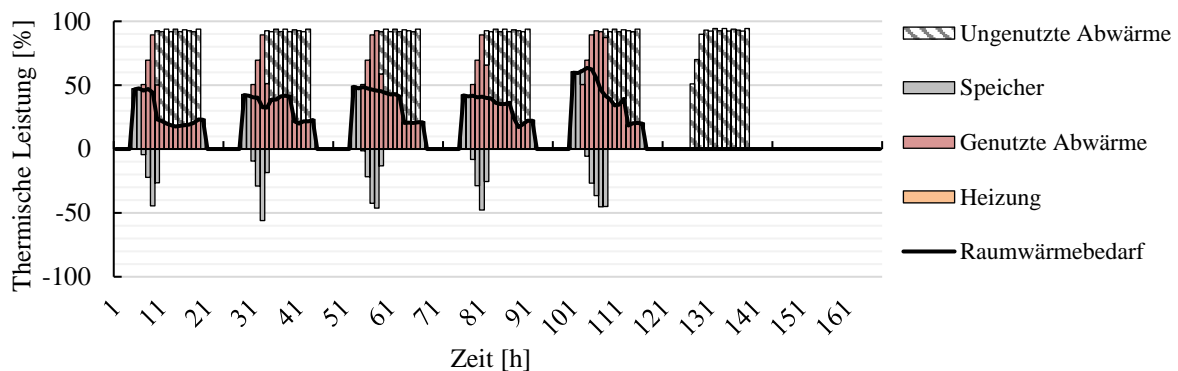


Abbildung 6-12: Wärmerückgewinnung aus Druckluftanlagen zur Bürogebäudeheizung für KW 1 (Januar), Hinweis: Ordinate entspricht thermische Leistung [kW_{th}] bezogen auf die Nennheizleistung [kW_{th}]

durch die verfügbare Abwärme gedeckt und gleichzeitig der in den frühen Morgenstunden genutzte Pufferspeicher aufgefüllt. Da die verfügbare Abwärme den Raumwärmebedarf überschreitet, kann ein Teil der Abwärme nicht weiter genutzt werden.

Durch die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen kommt es im Vergleich zur Einzelbewertung zu einer Reduktion des technischen Endenergieeinsparpotenzials um 364,0 MWh bzw. 19,5 % und des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials um 262,8 MWh bzw. 18,7 %. Die Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion führt in den Sommermonaten zu zusätzlichen Endenergieeinsparungen von 13,0 % im Bereich der Gebäudeklimatisierung sowie zu einem Mehrverbrauch in der kalten Jahreszeit von 8,5 % im Bereich der Hallenbeheizung. Der zusätzliche Endenergieverbrauch der Gebäudeheizung wird vollständig durch eine Wärmerückgewinnung aus den Kältemaschinen (HT06) gedeckt. Die spezifischen Energieeinsparkosten sind mit -14,1 EUR₂₀₁₅/MWh im Trendszenario gerade im wirtschaftlichen Bereich.

Typbetrieb 4: Flaschen

Der Typbetrieb 4 charakterisiert einen Standort zur Produktion von Flaschen im Extrusions- und Streckblasformen. Die jährliche Güterproduktion beträgt 6.982 t und verteilt sich zu 86,4 % auf die Herstellung von PET-Flaschen sowie zu 13,6 % auf die Herstellung von PE-Flaschen. Es wird an fünf Tagen pro Woche im Dreischichtbetrieb produziert. Dabei entsteht im Trendszenario ein Endenergieverbrauch von 11.322,2 MWh elektrischem Strom sowie 2.276,6 MWh Erdgas. Der spezifische Endenergieverbrauch beträgt 1,95 kWh/kg. Zur Produktion der PET-Flaschen wird das zweistufige Streckblasformen eingesetzt. Die PET-Preforms werden im Spritzgussverfahren hergestellt. Das PET-Granulat wird in dezentralen Granulattrocknern getrocknet. Für die Herstellung der PE-Flaschen werden neun Extrusionsblasformmaschinen mit je drei Kavitäten eingesetzt. In der Produktion entstehende Abfälle (Angüsse, Bautzen) werden in Beistellmühlen innerbetrieblich recycelt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Die Druckluftversorgung der Blasformmaschinen erfolgt aus einem Nieder- und einem Hochdrucknetz. Das Niederdrucknetz wird durch drei in Kaskade betriebenen Druckluftkompressoren und das Hochdrucknetz durch zwei weitere Druckluftkompressoren bedient. Die Kälteversorgung erfolgt temperaturspezifisch durch zentrale Kältemaschinen. Die Produktionshalle wird bei Bedarf durch eine Teilklimaanlage klimatisiert oder beheizt. Zum Einsatz kommt eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Mit 59,9 % sind die Motorensysteme die größten Stromverbraucher. Weitere 19,0 % des Stromverbrauchs entfallen auf die Prozess- und Klimakälte. Der spezifische Heizenergieverbrauch beträgt 120,38 kWh/m². Abbildung 6-13 zeigt die Energieeinsparpotenzialkurve für den Typbetrieb 4 im Trendszenario für das Basisjahr 2015. Das technische Endenergieeinsparpotenzial beträgt 2.958,3 MWh bzw. 21,8 % und das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial 2.507,7 MWh bzw. 18,4 %, jeweils bezogen auf den Endenergie-

verbrauch im Basisjahr 2015. Im Trendszenario entfallen 37,0 % des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials auf die Motorensysteme. Weitere 27,5 bzw. 32,3 % verteilen sich gleichmäßig auf die Bereiche Prozess- und Klimakälte sowie Raumwärme. Beleuchtung: 3,2 %

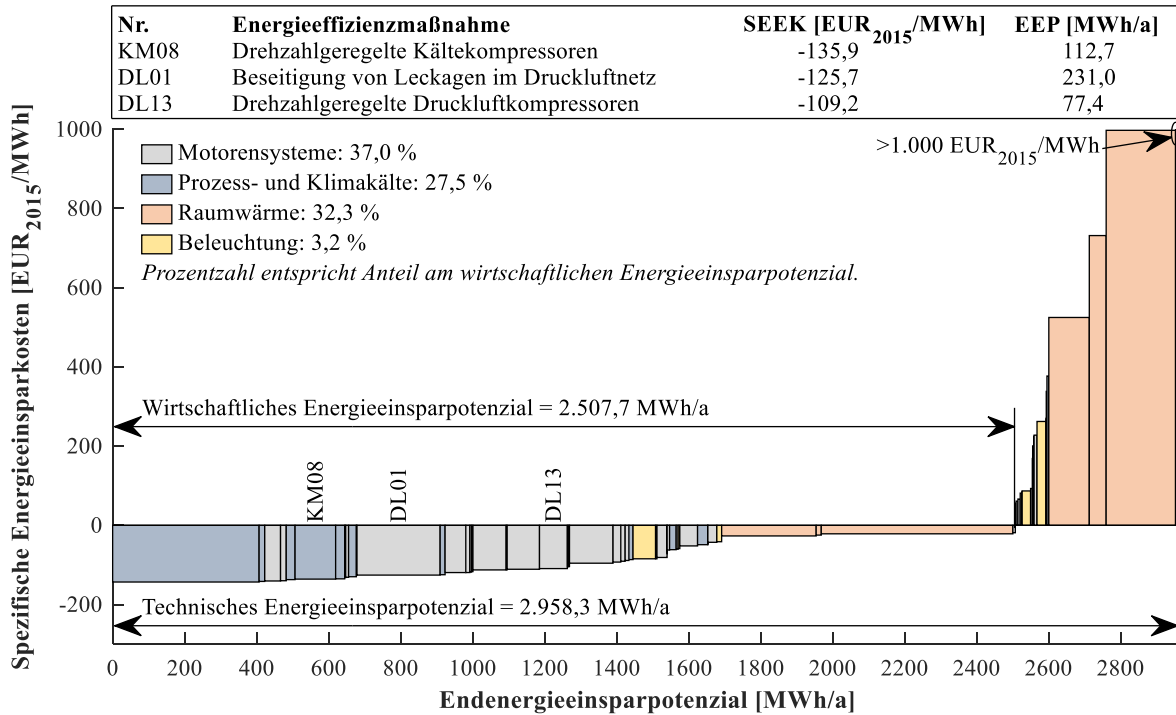


Abbildung 6-13: Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 4 zur Herstellung von Flaschen im Extrusions- und Spritzblasformen in Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario, mit SEEK (spezifische Energieeinsparkosten) und EEP (Endenergieeinsparpotenzial)

Aufgrund des großen Druckluftbedarfs bei der Herstellung von PET- und PE-Flaschen im Blasformverfahren sind Energieeffizienzmaßnahmen im Bereich der Druckluftversorgung hervorzuheben. So kann der Endenergieverbrauch der Druckluftkompressoren durch die Beseitigung von Leckagen im Druckluftnetz (DL01) um 231,0 MWh bzw. 10,7 % zu spezifischen Energieeinsparkosten von -125,7 EUR₂₀₁₅/MWh reduziert werden. Weitere 77,4 MWh können durch den Einsatz drehzahl geregelter Druckluftkompressoren (DL13) eingespart werden. Die spezifischen Energieeinsparkosten betragen -109,2 EUR₂₀₁₅/MWh. Mit 567,1 MWh hat die Optimierung der Druckluftversorgung im Bereich der Motorensysteme das größte Endenergieeinsparpotenzial. Dies entspricht einem Anteil von 64,3 % des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials im Bereich der Motorensysteme. Neben der Druckluftversorgung kommt auch der Prozesskälteversorgung bei der Herstellung von PET- und PE-Flaschen eine besondere Bedeutung zu. Prozesskälte wird an diversen Stellen im Produktionsprozess benötigt, bspw. zur Formteilkühlung beim Spritzgießen der PET-Preforms sowie beim Kühlen der ausgeformten Flaschen. Drehzahl geregelte Kälteverdichter (KM08) ermöglichen die stufenlose Anpassung der Kälteleistung an den Bedarf. Das Endenergieeinsparpotenzial von 112,7 MWh wird im Trendszenario zu spezifischen Energieeinsparkosten von -135,9 EUR₂₀₁₅/MWh erschlossen.

Die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen führt im Trendszenario technologieübergreifend zu einer Reduktion des technischen Endenergieeinsparpotenzials um 807,0 MWh bzw. 21,4 % und des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials um 544,4 MWh bzw. 17,8 %. In der Druckluftversorgung führen Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen zu einer Reduktion des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials um 19,1 %. Dabei treten sowohl positive als auch negative Effekte auf. Bei einer Einzelbewertung der Energieeffizienzmaßnahmen führt der Einsatz einer Drehzahlregelung im Niederdrucknetz zunächst zu keiner Endenergieeinsparung. Erst durch die Beseitigung der Leckagen im Druckluftnetz (DL01) und der damit verbundenen Reduktion des Druckluftbedarfs kann durch den Einsatz einer Drehzahlregelung (DL04) der Endenergieverbrauch der Druckluftkompressoren reduziert werden. Durch die Optimierung der Druckluftversorgung reduziert sich das Endenergieeinsparpotenzial einer Wärmerückgewinnung zur Raumwärmebereitstellung (HT05), aufgrund der geringeren verfügbaren Abwärme, um 6,7 %. Die Wirtschaftlichkeit der Wärmerückgewinnung ist aufgrund des dennoch bestehenden großen Endenergieeinsparpotenzials von dieser Reduktion der verfügbaren Abwärme nicht betroffen.

Typbetrieb 5: Baubedarf

Der Typbetrieb 5 charakterisiert einen Standort zur Produktion unterschiedlicher Baubedarfsartikel. Die jährliche Güterproduktion in Höhe von 1.877 t teilt sich zu 83,1 % auf die PVC-Profilproduktion sowie zu 16,9 % auf die Herstellung von Dübeln aus Polyamid (PA) auf. Die Produktion erfolgt fünf Tage pro Woche im Zweischichtbetrieb. Der jährliche Endenergieverbrauch beträgt im Trendszenario 1.994,1 MWh, wobei 56,6 % auf den Endenergieträger Erdgas entfallen. Der spezifische Endenergieverbrauch beträgt 1,06 kWh/kg. Die Profil- und Dübelproduktion erfolgt auf je drei Extrusionslinien respektive Spritzgussmaschinen. Das zur Produktion der Dübel eingesetzte Polyamid wird vor der Verarbeitung in zentralen Granulatrocknern getrocknet. Kunststoffabfälle werden in Beistellmühlen gemahlen und dem Produktionsprozess erneut als Rohstoff zugeführt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Zur Versorgung der Extrusions- bzw. Spritzgussanlagen mit Prozesskälte werden zwei zentrale Kältemaschinen eingesetzt. Das Druckluftnetz wird durch einen Grund- und einen Spitzenlastkompressor bedient. Eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung versorgt die Produktionshalle mit Frischluft. Die Produktionshalle wird während der gesamten Produktionszeit belüftet und bei Bedarf zentral beheizt. Der Anteil der Motorensysteme am Stromverbrauch beträgt 62,8 %, weitere 15,0 % entfallen auf die Prozess- und Klimakälte. Der spezifische Heizenergieverbrauch beträgt 113,99 kWh/m². Abbildung 6-14 zeigt die Energieeinsparkostenkurve des Typbetriebs 5 im Trendszenario für das Basisjahr 2015. Das technische Endenergieeinsparpotenzial beträgt 469,9 MWh bzw. 23,6 % und das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial 196,4 MWh bzw. 9,8 %, jeweils bezogen auf den Endenergieverbrauch im Basisjahr 2015. Mit 48,6 % ist etwa die Hälfte des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials im Bereich Motorensysteme

vorzufinden. Weitere 37,7 % entfallen auf die Prozess- und Klimakälte, 11,8 % auf die Beleuchtung und 1,9 % auf die Raumwärme.

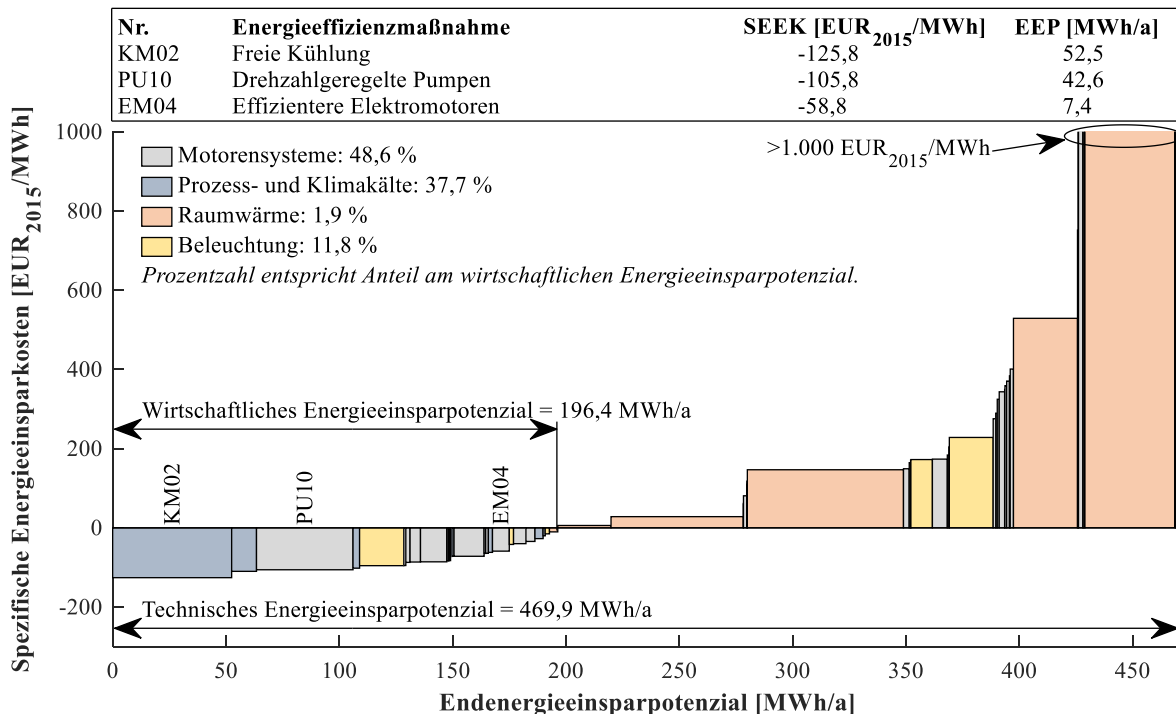


Abbildung 6-14: Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 5 zur Herstellung von Baubedarf im Spritzguss- und Extrusionsverfahren in Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario, mit SEEK (spezifische Energieeinsparkosten) und EEP (Endenergieeinsparpotenzial)

Durch den Einsatz drehzahlgeregelter Pumpen an der Kühl- und Kalibriereinheit der Profilextrusionslinien können Endenergieeinsparungen von 42,6 MWh zu spezifischen Energieeinsparkosten in Höhe von -105,8 EUR₂₀₁₅/MWh erzielt werden (vgl. Typbetrieb 1). Weitere 52,5 MWh können durch die freie Kühlung (KM02) eingespart werden. Dies entspricht einer Reduktion des Endenergieverbrauchs der zur Hydraulikkühlung eingesetzten Kältemaschine von 71,9 %. Dabei betragen die spezifischen Energieeinsparkosten -125,8 EUR₂₀₁₅/MWh. Abbildung 6-15 zeigt am Beispiel der Kalenderwoche 20 (KW 20) den Einsatz der freien Kühlung. Für die Hydraulikkühlung wird eine Kühltemperatur von 26 °C benötigt. Ab einer Außentemperatur von 26 °C wird somit ergänzend zur Kältemaschine die freie Kühlung eingesetzt (obere Grenze). Ab einer Außentemperatur von 16 °C erfolgt die gesamte Kälteversorgung mittels freier Kühlung (untere Grenze). In dem Temperaturfenster zwischen 16 °C und 26 °C Außentemperatur findet ein Kombibetrieb aus freier Kühlung und Kältemaschine statt (grau schraffierte Fläche). In der dargestellten Kalenderwoche erfolgt entsprechend von Montag bis Mittwoch ein Kombibetrieb. Die Kältemaschine deckt zeitweise bis zu 59,2 % des Kältebedarfs. Von Donnerstag bis Freitag unterschreitet die Außentemperatur konstant die untere Temperaturgrenze von 16 °C, sodass der Kältebedarf vollständig durch die freie Kühlung gedeckt wird.

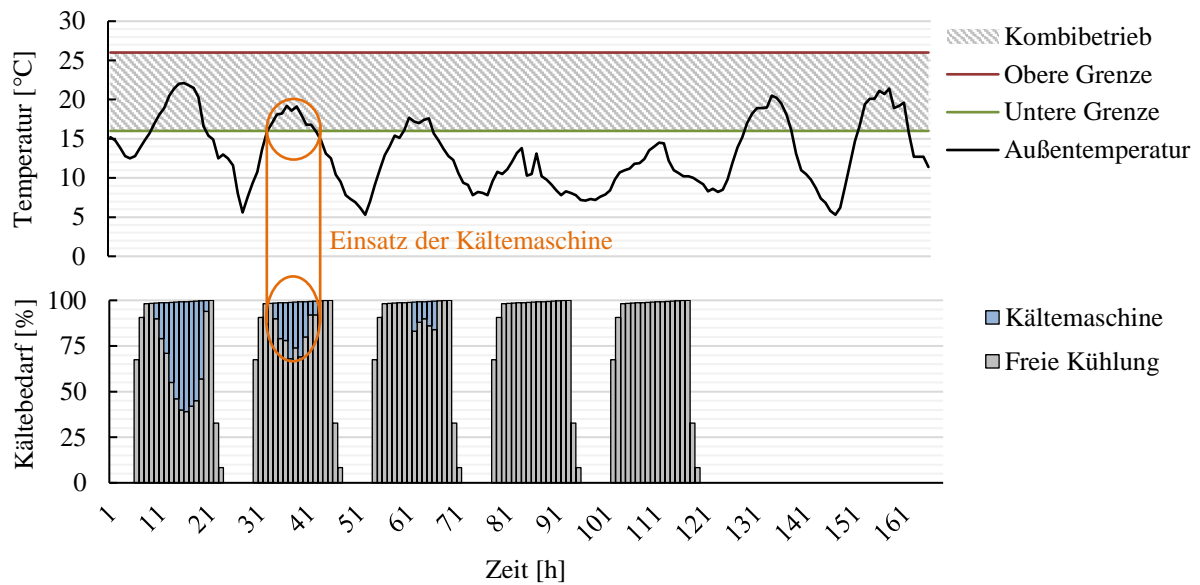


Abbildung 6-15: Einsatz der freien Kühlung (unten) in Abhängigkeit der Außentemperatur (oben) für KW 20

Durch die Berücksichtigung von Wechselwirkungen kommt es u. a. zu Veränderungen des Endenergieeinsparpotenzials im Bereich der Raumwärme. So steigt der Endenergieverbrauch der Hallenheizung durch die Optimierung der Produktion zunächst um 2,0 %. Dieser Anstieg kann technisch durch die Wärmerückgewinnung aus den Kältemaschinen (HT06) kompensiert werden. Diese führt zu einer Endenergieeinsparung in Höhe von 58,4 MWh bzw. 6,0 % des Endenergieverbrauchs der Hallenheizung, ist aber mit spezifischen Energieeinsparkosten in Höhe von 28,3 EUR₂₀₁₅/MWh im unwirtschaftlichen Bereich. Technologieübergreifend führen Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen zu einer Reduktion des technischen Endenergieeinsparpotenzials um 88,1 MWh bzw. 15,8 % und des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials um 98,3 MWh bzw. 33,4 %, jeweils bezogen auf die Einzelbewertung.

Typbetrieb 6: Technische Teile

Der Typbetrieb 6 charakterisiert einen Standort zur Produktion technischer Teile. Die jährliche Güterproduktion beträgt 1.651 t. Davon entfallen 72,7 % auf die Produktion von technischen Teilen aus Polyamid (PA) sowie 27,3 % auf die Produktion von technischen Teilen aus Polypropylen (PP). Die Produktion erfolgt im Zweischichtbetrieb an fünf Wochentagen. Der jährliche Endenergieverbrauch beträgt im Trendszenario 4.030,8 MWh. Elektrischer Strom stellt mit einem Anteil von 72,7 % den mengenmäßig relevantesten Endenergeträger dar. Weitere 27,3 % entfallen auf Erdgas. Der spezifische Endenergieverbrauch beträgt 2,44 kWh/kg. Die Produktion erfolgt auf insgesamt 14 Spritzgussmaschinen. Das Polyamidgranulat wird in zentralen Granulattrocknern getrocknet. Die bei der Produktion anfallenden Angüsse werden in dezentralen Beistellmühlen gemahlen und anschließend dem neuen Granulat in Mischern beigemischt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Die Versorgung der Spritzgussmaschinen mit Prozesskälte erfolgt aus zwei Kältemaschinen. Der Typbetrieb 6 verfügt über einen Druckluftkompressor. Die

Produktionshalle wird ganzjährig belüftet und bei Bedarf zentral beheizt oder durch eine Teilklimaanlage klimatisiert. Die Lüftungsanlage verfügt über eine Wärmerückgewinnung. Der spezifische Heizenergieverbrauch des Typbetriebs 6 beträgt 100,94 kWh/m². Abbildung 6-16 zeigt die Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 6. Das technische Endenergieeinsparpotenzial beträgt 773,4 MWh bzw. 19,2 % und das unter den getroffenen Annahmen wirtschaftlich realisierbare Endenergieeinsparpotenzial 384,4 MWh bzw. 9,5 %, jeweils bezogen auf den Endenergieverbrauch im Basisjahr 2015. Etwa 35,5 % des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials entfallen auf den Bereich Motorsysteme. Mit 27,5 bzw. 29,9 % verteilt sich ein Großteil des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials etwa gleichmäßig auf die Bereiche Prozess- und Klimakälte sowie auf die Raumwärme. Weitere 7,1 % entfallen auf die Beleuchtung.

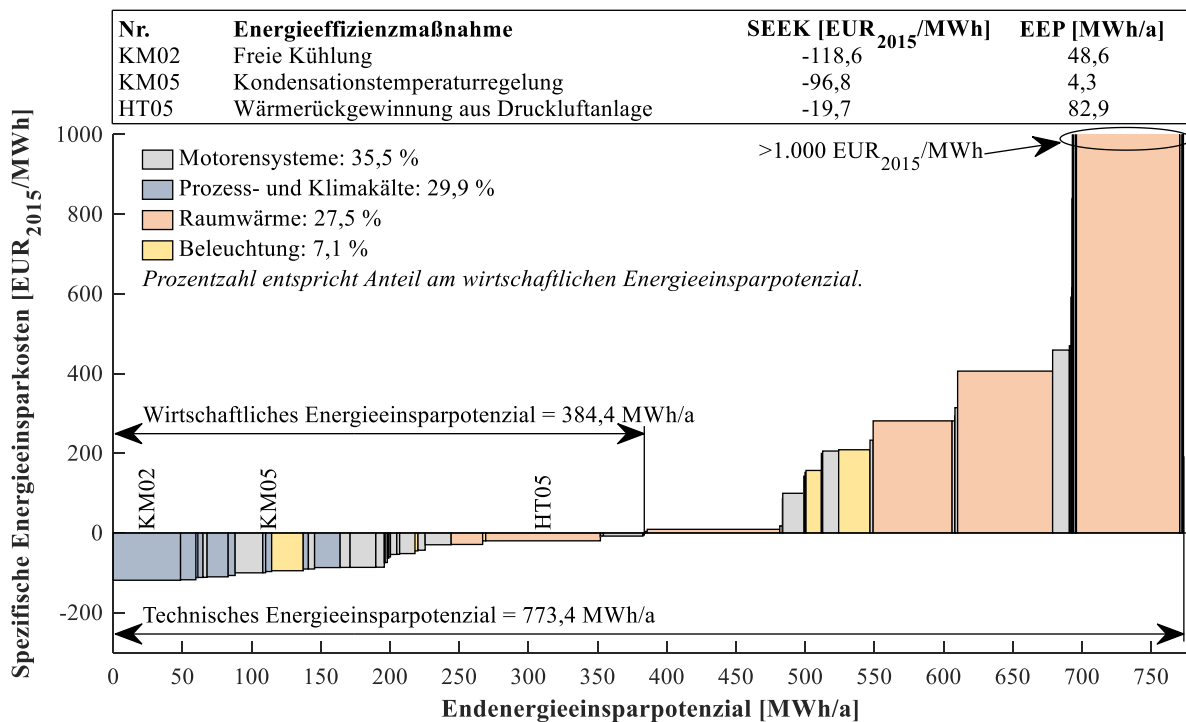


Abbildung 6-16: Energieeinsparkostenkurve für den Typbetrieb 6 zur Herstellung von technischen Teilen im Spritzgussverfahren in Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario, mit SEEK (spezifische Energieeinsparkosten) und EEP (Endenergieeinsparpotenzial)

Wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenziale sind insbesondere im Bereich der Prozesskälte sowie der Raumwärme vorzufinden. So kann der Endenergieverbrauch der Formteilkühlung durch die Kombination der freien Kühlung (KM02) mit der Kondensationstemperaturregelung (KM05) um 53,0 MWh bzw. 35,5 % reduziert werden. Die spezifischen Energieeinsparkosten betragen -118,6 EUR₂₀₁₅/MWh respektive -96,8 EUR₂₀₁₅/MWh. Zudem führt die Wärmerückgewinnung aus der Druckluftanlage (HT05) zu einer Reduktion des Endenergieverbrauchs der Bürogebäudeheizung um 82,9 MWh bei spezifischen Energieeinsparkosten in

Höhe von -19,7 EUR₂₀₁₅/MWh. Ferner kann die aus der Hydraulikkühlung verfügbare Abwärme (HT06) zur Hallenbeheizung genutzt werden, sodass Endenergieeinsparungen von 95,8 MWh erzielt werden. Die spezifischen Energieeinsparkosten liegen jedoch mit 9,2 EUR₂₀₁₅/MWh im knapp unwirtschaftlichen Bereich.

Durch die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen wird das technische Endenergieeinsparpotenzial um 163,3 MWh bzw. 17,4 % und das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial um 93,0 MWh bzw. 19,5 %, jeweils im Vergleich zur Einzelbewertung, reduziert. Im Bereich der Prozess- und Klimakälte führt die Kombination diverser, in direkter Abhängigkeit stehender, Energieeffizienzmaßnahmen zu einer Reduktion des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials um 14,7 % (im Vergleich zur Einzelbewertung). Ebenso reduzieren Wechselwirkungen das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial im Bereich der Motorensysteme um 22,2 %.

6.3.2 Potenziale der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Potenzialanalyse auf Ebene der Produkte bzw. Typbetriebe auf die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland übertragen. Dabei erfolgt zunächst ein Vergleich ausgewählter Standortkennzahlen. Anschließend wird das technologie-spezifische wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial auf Produkt- bzw. Typbetriebsebene verglichen und auf Deutschland extrapoliert.

Standortkennzahlen

Die charakteristischen Typbetriebe sind durch individuelle, produktspezifische Produktionsprozesse gekennzeichnet. Entsprechend können diese anhand diverser Standortkennzahlen unterschieden werden. Tabelle 6-8 fasst ausgewählte Standortkennzahlen für die Typbetriebe zusammen. Außerdem wurde der mit dem Endenergieverbrauch der Typbetriebe gewichtete Mittelwert als Durchschnittskennzahl für die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland berechnet. Darüber hinaus sind in der Literatur vorzufindende Angaben als Vergleichswerte dargestellt. Diese wurden anhand einer Literatursichtung erhoben und basieren im Wesentlichen auf den in Abschnitt 6.1.3 (Tabelle 6-3, S. 98) dokumentierten Studien, Berichten und Energieaudits. Die anwendungsspezifischen Angaben zum Anteil der betrachteten Verbraucher am Stromverbrauch eines Typbetriebs haben jeweils den berechneten Stromverbrauch als Bezugsgröße. Da in dem vorgestellten Energienachfragemodell keine vollständige Abdeckung aller Verbraucher eines realen Standorts vorliegt, sind – im Vergleich zu den in der Literatursichtung ermittelten Werten – höhere Anteile der betrachteten Anwendungen am Stromverbrauch zu erwarten.

Tabelle 6-8: Auswertung ausgewählter Kennzahlen der Typbetriebe (inkl. Vergleichswerten)

Dimension	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6	DE ²⁾	Literatur ³⁾
Prozesswärme ¹⁾	%	8,6	18,7	14,8	18,7	10,5	10,6	13,2	5 bis 25
Beleuchtung ¹⁾	%	12,1	4,2	2,6	2,4	11,1	3,7	4,6	5 bis 9
Motorensysteme ¹⁾	%	71,1	71,1	73,5	59,9	62,8	76,3	72,6	40 bis 60
Prozess- und Klimakälte ¹⁾	%	8,0	5,9	8,9	19,0	15,0	9,1	9,3	4 bis 19
Spez. HEV ⁴⁾	kWh/m ²	157,41	164,74	122,75	120,38	113,99	100,94	126,23	9 bis 425
Spez. EEV ⁵⁾	kWh/kg	1,36	1,16	0,94	1,95	1,06	2,44	1,44	0,6 bis 6,2
Spez. Platzbedarf	kg/m ²	256,00	354,86	704,14	369,18	189,56	151,40	311,75	83 bis 1.424

¹⁾ Anteil am Stromverbrauch.

²⁾ Mit dem Endenergieverbrauch gewichteter Mittelwert der Typbetriebe.

³⁾ Zusammenstellung basierend auf Literatursichtung (s. Tabelle 6-3, S. 98).

⁴⁾ Ein spez. Heizenergieverbrauch von < 100 kWh/m² wird in der ausgewerteten Literatur ausschließlich erreicht, wenn bereits eine Wärmerückgewinnung aus Druckluft- und/oder Kältekompressoren eingesetzt wird. Ein Betrieb weist einen spez. Heizenergieverbrauch von > 250 kWh/m² auf (Grund nicht dokumentiert). Die übrigen Betriebe haben einen spez. Heizenergieverbrauch von 125 bis 235 kWh/m² (Ökotec 2007).

⁵⁾ Im Jahr 2015 beträgt der, basierend auf den Typbetrieben berechnete, durchschnittliche Endenergieverbrauch in der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland 1,44 kWh/kg. Der spezifische Endenergieverbrauch der durch die Typbetriebe abgebildeten Wirtschaftszweige beträgt im gewichteten Mittel 1,61 kWh/kg.

DE Deutschland

EEV Endenergieverbrauch

HEV Heizenergieverbrauch

Für die Prozesswärme schwankt der Anteil am Stromverbrauch in Abhängigkeit der Typbetriebe zwischen 8,6 % und 18,7 %. Im gewichteten Mittel beträgt der Anteil der Prozesswärme 13,2 %. Das Ergebnis der Literatursichtung zeigt für die Prozesswärme eine Bandbreite von 5 bis 25 %. Der Anteil der Beleuchtung am Stromverbrauch wird in der Literatur mit 5 bis 9 % bemessen. Hier liegt eine Abweichung der Typbetriebe sowohl nach oben als auch nach unten vor. Im Trendszenario schwankt der Anteil der Beleuchtung am Stromverbrauch zwischen 2,4 und 12,1 %. Der hohe Anteil der Beleuchtung am Stromverbrauch für den Typbetrieb 1 ist mit dem Produktionsplan (Dreischichtbetrieb) zu begründen. Somit sind die Betriebsstunden der Beleuchtung in der Produktion im Vergleich zum Zweischichtbetrieb deutlich höher. Das gewichtete Mittel liegt mit 4,6 % im unteren Bereich des in der Literatur identifizierten Intervalls. Für die Motorensysteme liegt das gewichtete Mittel mit 72,6 % über dem in der Literatur angegebenen Intervall von 40 bis 60 %. Insbesondere für die Motorensysteme ist ein Vergleich aufgrund unterschiedlicher Bilanzgrenzen gemessen an den übrigen Bereichen erschwert. Vielfach wird in den berücksichtigten Literaturquellen nicht näher spezifiziert, welche Verbraucher dem Bereich der Motorensysteme zugerechnet werden. Für die Modellrechnung umfassen die Motorensysteme die folgenden Anwendungen: Elektromotoren, Pumpen und Ventilatoren sowie Druckluftkompressoren. Da der Fokus des Energienachfragemodells auf der Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen für Querschnittstechnologien liegt, sind möglicherweise Motoranwendungen im Vergleich zu den übrigen Anwendungen überrepräsentiert. Für den Anteil

der Prozess- und Klimakälte am Stromverbrauch liegt wiederum eine hohe Deckung zwischen Modellergebnissen und Literaturwerten vor.

Neben den strombasierten (Querschnitts-)Anwendungen umfasst das Energienachfragemodell auch die Raumwärmeversorgung. Der spezifische Heizenergieverbrauch der Typbetriebe schwankt im Trendszenario zwischen 100,94 und 164,74 kWh/m². Damit liegen die definierten Typbetriebe im Wertebereich der vorliegenden Energieaudits. Hier wurde ein Wertebereich von 9 kWh/m² bis 425 kWh/m² identifiziert. Ein spezifischer Heizenergieverbrauch von <100 kWh/m² wurde ausschließlich in Betrieben mit Wärmerückgewinnung aus den bestehenden Druckluft- oder Kälteanlagen realisiert. Der Betrieb mit einem spezifischen Heizenergieverbrauch von 425 kWh/m² scheint, im Vergleich zu den übrigen Betrieben, ein Ausreißer zu sein. Der zweithöchste identifizierte spezifische Heizenergieverbrauch ist mit 235 kWh/m² um 44,7 % niedriger.

Energieträgerübergreifend variiert der spezifische Endenergieverbrauch der Typbetriebe, in Abhängigkeit der produzierten Güter, zwischen 0,94 kWh/kg und 2,44 kWh/kg. Im gewichteten Mittel beträgt der spezifische Endenergieverbrauch der Typbetriebe 1,44 kWh/kg. Damit liegt der spezifische Endenergieverbrauch der Typbetriebe unter dem gewichteten spezifischen Endenergieverbrauch der abgebildeten Typbetriebe in Höhe von 1,61 kWh/kg. Dies ist insofern plausibel, als das Energienachfragemodell keine vollständige Technologieabbildung beansprucht.

Technologiespezifische Endenergieeinsparpotenziale

Die im Rahmen der Potenzialanalyse identifizierten Endenergieeinsparpotenziale der Typbetriebe sind in Abbildung 6-17 anwendungsspezifisch für das Trendszenario sowie das positive und negative Extremszenario aufgeführt. Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Typbetrieben zu ermöglichen, ist das relative Endenergieeinsparpotenzial bezogen auf die Güterproduktion in Kilowattstunden pro Kilogramm aufgetragen. Darüber hinaus sind, analog zu den in Tabelle 6-8 dargestellten Standortkennzahlen, die mit dem Endenergieverbrauch gewichteten Endenergieeinsparpotenziale als Indikator für die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland aufgetragen. Im Vergleich der Typbetriebe entfällt das größte spezifische wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial auf die Herstellung von Flaschen. Die geringsten spezifischen wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenziale entfallen auf die Herstellung von Baubedarfsartikeln. Im gewichteten Mittel über alle Typbetriebe beträgt das spezifische wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial 0,12 bis 0,21 kWh/kg. Mit Blick auf die anwendungsspezifischen Endenergieeinsparpotenziale entfällt für alle Typbetriebe der Großteil des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials auf den Bereich der Motorensysteme. Im gewichteten Mittel beträgt das spezifische wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial im Bereich der Motorensysteme 0,04 bis 0,08 kWh/kg. Unterschiede zwischen den Typbetrieben sind insbesondere in den Bereichen der Prozess- und Klimakälte sowie der Raumwärme vorzufinden. So beträgt das

spezifische wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial im Bereich der Prozess- und Klimakälte bei der Herstellung von Stangen und Rohren im Trendszenario 0,02 kWh/kg. Bei der Produktion von Flaschen ist das spezifische wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial mit 0,10 kWh/kg im Trendszenario um den Faktor fünf höher. Im Bereich der Raumwärme fällt das größte spezifische wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial mit 0,06 bis 0,13 kWh/kg bei der Herstellung von technischen Teilen an. Im gewichteten Mittel beträgt das spezifische gewichtete Endenergieeinsparpotenzial im Bereich der Raumwärme 0,04 bis 0,07 kWh/kg.

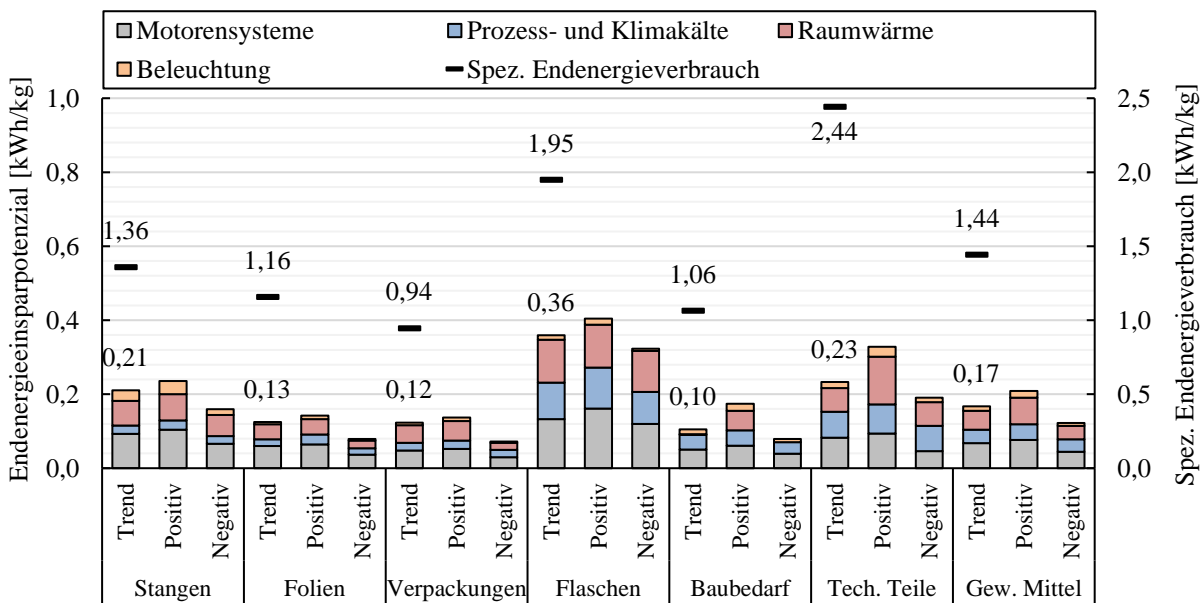


Abbildung 6-17: Spezifisches wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial der Typbetriebe im Trendszenario sowie im positiven und negativen Extremszenario für das Basisjahr 2015

Ergänzend zu der aggregierten Darstellung der wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenziale fasst Tabelle 6-9 das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial der Typbetriebe im Trendszenario zusammen. Ferner wird das mit dem Endenergieverbrauch der Typbetriebe gewichtete Endenergieeinsparpotenzial als Indikator für die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland dargestellt. Im Gegensatz zu Abbildung 6-17 wird nicht die Güterproduktion, sondern der Ausgangsendenergieverbrauch der jeweiligen Technologien als Bezugsgröße zur Quantifizierung des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials dargelegt. Neben den Ergebnissen der integrierten Bewertung sind auch die Ergebnisse der Einzelbewertung im gewichteten Mittel dargestellt (EBW-DE). Damit ermöglichen die in Tabelle 6-9 dargestellten Ergebnisse sowohl eine Einordnung der technologiespezifischen Endenergieeinsparpotenziale als auch eine Einordnung mit Blick auf den Einfluss von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen bei der Analyse wirtschaftlicher Endenergieeinsparpotenziale. Im gewichteten Mittel beträgt das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial im Trendszenario 11,6 %. Dabei variiert das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial auf Ebene der Typbetriebe im Trendszenario zwischen 9,5 % für die Herstellung technischer Teile und 18,4 % für die Herstellung von

Flaschen. Demgegenüber steht ein gewichtetes wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial von 15,0 % bei der Einzelbewertung (d. h. ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen). Damit beträgt die Abweichung zwischen der integrierten Bewertung und der Einzelbewertung im Trendszenario 29,6 %. Diese Abweichung ist vollständig der Vernachlässigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen zuzuordnen.

Tabelle 6-9: Vergleich des ermittelten wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials mit den Ergebnissen einer Einzelbewertung für das Trendszenario

Dimension	Einheit	Wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial ¹⁾								Abweichung ⁴⁾
		Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6	DE ²⁾	EBW-DE ^{2,3)}	
Beleuchtung	%	32,5	21,5	31,9	30,1	24,2	25,0	27,1	42,5	+56,9
Motorensysteme ⁵⁾	%	17,6	12,2	8,4	13,7	17,4	6,1	9,6	13,4	+39,6
Elektromotoren	%	3,6	4,3	3,2	6,5	5,5	2,3	3,3	4,0	+19,6
Pumpen	%	51,2	30,2	3,5	6,1	31,2	2,8	8,1	11,9	+46,5
Ventilatoren	%	20,1	22,3	31,9	21,6	22,3	20,2	22,4	35,1	+56,4
Druckluftkompressoren	%	8,1	27,9	19,8	26,2	15,3	37,1	25,6	32,8	+28,3
Prozess- und Klimakälte	%	37,8	44,2	29,5	30,2	57,1	36,1	36,7	45,1	+22,8
Raumwärme	%	10,8	8,8	27,7	35,5	0,3	9,6	10,9	12,5	+15,0
Gesamt	%	15,5	10,8	13,0	18,4	9,8	9,5	11,6	15,0	+29,6

¹⁾ Angaben in Prozent, jeweils bezogen auf den Endenergieverbrauch der Technologie im Ursprungssystem (bspw. wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial der Elektromotoren bezogen auf den Endenergieverbrauch der Elektromotoren im Ursprungssystem).

²⁾ Berechnung der Werte für Deutschland entsprechend dem mit dem Endenergieverbrauch gewichteten Mittelwert der Typbetriebe.

³⁾ Wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial bei der Einzelbewertung der Energieeffizienzmaßnahmen (ohne Berücksichtigung der technischen Wechselwirkungen) im gewichteten Mittel der Typbetriebe.

⁴⁾ Abweichung zwischen dem mittels heuristischer Optimierung ermittelten Endenergieeinsparpotenzial sowie dem Endenergieeinsparpotenzial bei der Einzelbewertung.

⁵⁾ Mit dem Endenergieverbrauch gewichteter Mittelwert der Bereiche Elektromotoren, Pumpen, Ventilatoren und Druckluftkompressoren.

DE Deutschland

EBW Einzelbewertung

Technologiespezifisch schwankt das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial im Trendszenario im gewichteten Mittel zwischen 3,3 % für Elektromotoren, 22,4 % für Ventilatorensysteme und 36,7 % in der Prozess- und Klimakälte. Wird bei der Bewertung der wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenziale auf die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen verzichtet, führt dies auch technologiespezifisch zu signifikanten Fehleinschätzungen. So variieren die Abweichungen zwischen der Einzelbewertung und der integrierten Bewertung technologiespezifisch im gewichteten Mittel zwischen 19,6 % für Motorensysteme, 28,3 % für die Druckluftversorgung und 46,5 % für Pumpensysteme. Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen treten dabei sowohl direkt zwischen Energieeffizienzmaßnahmen innerhalb einer Prozessgruppe als auch indirekt durch die Rückkopplung auf die Heizungs- bzw. Klimatisierungsinfrastruktur auf. Zwar kommt es in Einzelfällen

zu Synergien zwischen Energieeffizienzmaßnahmen, für die überwiegende Mehrzahl der bewerteten Energieeffizienzmaßnahmen dominieren aber die negativen Folgen der Wechselwirkungen.

Aufbauend auf der anwendungsspezifischen Analyse der wirtschaftlichen Energieeffizienzpotenziale in Abbildung 6-17 und Tabelle 6-9 zeigt Abbildung 6-18 die extrapolierten Ergebnisse der durchgeführten Potenzialanalyse in Form einer Energieeinsparungskurve. Dabei sind die Ergebnisse des Trendszenarios sowie der positiven und negativen Extremszenarios dargestellt und ausgewählte Energieeffizienzmaßnahmen hervorgehoben. Weiterführende Ergebnisse zum positiven und negativen Extremszenario sind ebenfalls in Anhang C (Tabelle C-5 bis Tabelle C-12, S. 198 ff.) zusammengefasst. Das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial in Deutschland beträgt für die betrachteten Wirtschaftszweige im Trendszenario 1.384,0 GWh bzw. 11,6 %. Im negativen bzw. positiven Extremszenario variiert das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial im Bereich von 1.014,1 bis 1.727,1 GWh. Das technische Endenergieeinsparpotenzial beträgt 2.323,3 GWh bzw. 19,5 % im Trendszenario und 2.256,4 bis 2.612,1 GWh im negativen bzw. positiven Extremszenario. Tabelle 6-10 fasst die identifizierten wirtschaftlichen und technischen Endenergieeinsparpotenziale zusammen.

Tabelle 6-10: Wirtschaftliches und technisches Endenergieeinsparpotenzial der im Rahmen der Szenarioanalyse betrachteten Wirtschaftszweige der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland

Endenergieeinsparpotenzial	Einheit	Szenario		
		Negativ	Trend	Positiv
Wirtschaftlich	GWh/a	1.014,1	1.384,0	1.727,1
Technisch	GWh/a	2.256,4	2.323,3	2.612,1

Zu den wirtschaftlichen Energieeffizienzmaßnahmen mit dem größten Endenergieeinsparpotenzial zählen unter anderem die freie Kühlung (KM02) und der Einsatz drehzahl geregelter Pumpen (PU10). Das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial der freien Kühlung beträgt in den betrachteten Szenarios zwischen 161,7 und 205,2 GWh bei gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten von -89,2 bis -175,0 EUR₂₀₁₅/MWh. Auf den Einsatz drehzahl geregelter Pumpen entfällt ein wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial von 65,3 bis 88,6 GWh. Die gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten betragen -79,9 bis -159,9 EUR₂₀₁₅/MWh. Darüber hinaus kann der Endenergieverbrauch im Bereich der Druckluftversorgung durch die Beseitigung von Leckagen (DL01) unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten um 68,3 bis 75,8 GWh reduziert werden. Die spezifischen Energieeinsparkosten variieren dabei zwischen -58,3 und -158,7 EUR₂₀₁₅/MWh. Während im positiven Extremszenario die Beseitigung von Leckagen in allen betrachteten Typbetrieben zu negativen spezifischen Energieeinsparkosten abbildbar ist, fallen im negativen Extremszenario weitere 3,7 GWh zu gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten in Höhe von 55,2 EUR₂₀₁₅/MWh an.

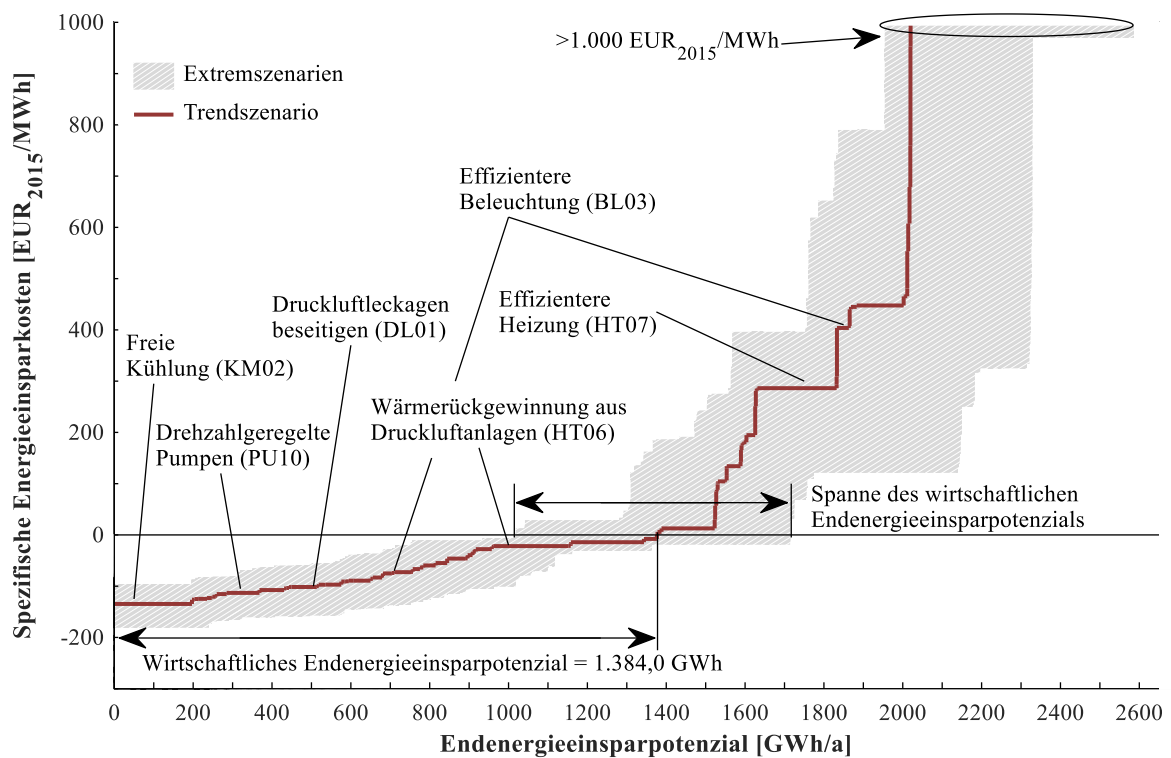


Abbildung 6-18: Energieeinsparkostenkurve der sechs charakteristischen Typbetriebe für Deutschland im Jahr 2015 für das Trendszenario sowie das positive und negative Extremszenario

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Energieeffizienzmaßnahmen sind der Einsatz einer effizienten Beleuchtung (BL03) sowie die Wärmerückgewinnung aus der Druckluftversorgung in Abhängigkeit des Typbetriebs wirtschaftlich bzw. nicht wirtschaftlich. Die Wirtschaftlichkeit einer effizienten Beleuchtung wird dabei sowohl durch die Bestandstechnologie als auch durch die jährlichen Betriebsstunden definiert. Das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial beträgt 62,2 bis 108,1 GWh. Die gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten betragen -48,7 bis -114,8 EUR₂₀₁₅/MWh. Weitere 30,1 bis 72,8 GWh können zu gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten von 230,9 bis 441,9 EUR₂₀₁₅/MWh eingespart werden. Das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial durch die Wärmerückgewinnung aus den Druckluftanlagen (HT05) beträgt 190,9 GWh im Trendszenario bei gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten in Höhe von -21,8 EUR₂₀₁₅/MWh. Weitere 10,1 GWh können im Trendszenario zu gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten von 6,0 EUR₂₀₁₅/MWh realisiert werden. Ein großes technisches Endenergieeinsparpotenzial wurde im Bereich der Raumwärme identifiziert. Durch den Einsatz effizienterer Heizungen (HT07), die Gebäudedämmung (HT01) sowie die Wärmedämmverglasung (HT02) kann der Endenergieverbrauch der Raumwärmeversorgung um 564,4 bis 740,6 GWh reduziert werden. Mit gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten in Höhe von 119,8 bis 397,5 EUR₂₀₁₅/MWh für die effizientere Heizung (HT07), 968,3 bis 2.164,2 EUR₂₀₁₅/MWh für die Gebäudedämmung (HT01) sowie 323,7 bis 791,3 EUR₂₀₁₅/MWh für die Wärmedämmverglasung (HT02) kann dieses Potenzial – unter den in der Szenarioanalyse getroffenen Annahmen – wirtschaftlich nicht gehoben werden.

Tabelle 6-11 fasst die Potenziale zur jährlichen Kostenreduktion der Typbetriebe im Trendszenario zusammen. Werden alle im Trendszenario als wirtschaftlich identifizierten Energieeffizienzmaßnahmen realisiert, kann eine jährliche Kostenreduktion von 6,4 bis 15,0 % (bezogen auf die Energiekosten der Typbetriebe im Basisjahr 2015) erreicht werden. In Abhängigkeit der Typbetriebe variiert die jährliche Kostenreduktion im Trendszenario zwischen 18.603 EUR_{2015/a} für die Herstellung von Baubedarfsartikel und 216.275 EUR_{2015/a} für die Herstellung von Flaschen.

Tabelle 6-11: Potenzial zur Kostenreduktion der Typbetriebe durch Umsetzung aller im Trendszenario als wirtschaftlich identifizierten Energieeffizienzmaßnahmen

Dimension	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6	
Input	Strompreis ¹⁾			12,13				
	Gaspreis ¹⁾			3,05				
	Güterproduktion ²⁾	t/a	7.106	9.983	9.284	6.982	1.877	1.651
Berechnet	Stromverbrauch ²⁾	MWh/a	5.267	6.902	7.136	11.322	866	2.930
	Gasverbrauch ²⁾	MWh/a	4.369	4.635	1.618	2.277	1.128	1.101
	Jährliche Energiekosten ³⁾	1.000 EUR _{2015/a}	772,2	978,6	915,0	1.442,8	139,4	389,0
	Jährliche Kostenreduktion ⁴⁾	1.000 EUR _{2015/a}	111,0	81,2	73,5	216,3	18,6	24,8
	Jährliche Kostenreduktion ⁵⁾	%	14,4	8,3	8,0	15,0	13,3	6,4
	Spez. Energiekosten ⁶⁾	EUR-ct _{2015/kg}	10,87	9,80	9,86	20,66	7,43	23,56
Spez. Kostenreduktion ⁵⁾	EUR-ct _{2015/kg}	1,56	0,81	0,79	3,10	0,99	1,50	

¹⁾ S. Definition der Trendszenarien: Tabelle 6-6, S. 103.

²⁾ S. Potenziale unterschiedlicher Produktgruppen: Abschnitt 6.2.2.

³⁾ Berechnung der Energiekosten: Produkt aus Strom- bzw. Gaspreis und Strom- bzw. Gasverbrauch. Dies umfasst ausschließlich die Energiekosten der im Energienachfragemodell erfassten Verbraucher.

⁴⁾ Jährliche Kostenreduktion (Produkt aus spezifischen Energieeinsparkosten und Endenergieeinsparung einer Energieeffizienzmaßnahme) bei Umsetzung aller im Rahmen des Trendszenarios als wirtschaftlich identifizierten Energieeffizienzmaßnahmen (spezifische Energieeinsparkosten < 0 EUR_{2015/MWh}). Ergebnisse Trendszenario s. Anhang C (Tabelle C-1 und Tabelle C-2, S. 190 ff.)

⁵⁾ Jährliche Kostenreduktion bezogen auf die jährlichen Energiekosten bzw. die jährliche Güterproduktion.

⁶⁾ Jährliche Energiekosten bezogen auf die jährliche Güterproduktion.

DE Deutschland

Durch die Umsetzung aller im Trendszenario als wirtschaftlich identifizierten Energieeffizienzmaßnahmen können die güterspezifischen Kosten um 0,79 bis 3,10 EUR-ct_{2015/kg} reduziert werden. Im gewichteten Mittel beträgt die erzielbare güterspezifische Kostenreduktion im Trendszenario 1,20 EUR-ct_{2015/kg}. Die durchschnittlich jährliche Kostenreduktion der im Energienachfragemodell erfassten Typbetriebe beträgt im Trendszenario 43.727 EUR_{2015/a} (bzw. 8,8 % bezogen auf die jährlichen Energiekosten im Basisjahr).

Einordnung der Ergebnisse

Eine vergleichende Analyse der berechneten wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenziale mit den Ergebnissen anderer Studien ist nur in begrenztem Ausmaß möglich. Insbesondere im Bereich der Querschnittstechnologien existieren für den Bilanzraum Deutschland überwiegend Berichte, die der grauen Literatur zuzuordnen sind. Die exakte Differenzierung zwischen theoretischen, technischen oder wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzialen ist nicht immer gegeben. Entsprechend kann die nachfolgende Einordnung ausschließlich als grobe Ergebniseinordnung verstanden werden. Eine differenzierte Analyse für die Gründe etwaiger Abweichungen ist aufgrund der mangelnden Dokumentation der methodischen Vorgehensweise sowie der zugrundeliegenden Daten mehrheitlich nicht möglich.

Die Deutsche Energie-Agentur (DENA) publizierte im Rahmen der INITIATIVE ENERGIEEFFIZIENZ+ INDUSTRIE & GEWERBE eine Berichtsreihe, die Angaben zum durchschnittlichen technischen und/oder wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzial von Motorsystemen vornimmt. So wird das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial von elektrischen Motorsystemen mit 20–30 % beziffert (dena 2010a). Für Pumpen- und Ventilatorsysteme sowie in der Kälteerzeugung sind in der Industrie Endenergieeinsparpotenziale von durchschnittlich jeweils 5–30 % gegeben, wobei ein Großteil des Potenzials durch Energieeffizienzmaßnahmen mit einer Amortisation kleiner drei Jahren realisierbar ist (dena 2010b, 2010c, 2010d). Ebenso sind im Bereich der Druckluftversorgung wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenziale von ca. 30 % vorzufinden (dena 2010e). In Publikationen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) sowie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) wird das technische Endenergieeinsparpotenzial von Pumpen mit 25–40 % und das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial mit 12–15 % beziffert (BMWi 2010; BMU 2009). In einer Studie von Schmid et al. (2003) wird das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial – u. a. von Querschnittstechnologien – für Deutschland im Referenzjahr 1999 quantifiziert. Dieses beträgt 11 % bei elektrischen Antrieben, 12–15 % bei Pumpen, 33 % bei Druckluftanlagen, 18 % bei der Kälteerzeugung, 24 % bei der elektrischen Beleuchtung sowie 6 % durch den Einsatz von Brennwertkesseln und 14 % durch die Gebäudedämmung (Schmid et al. 2003). Trotz des veralteten Bezugsjahrs bewegen sich die wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenziale von Querschnittstechnologien damit im Rahmen der bspw. von der DENA genannten Korridore für das wirtschaftliche Energieeinsparpotenzial. In der Dissertationsschrift ENERGIEEFFIZIENZ UND ABWÄRMENUTZUNG IN DER KUNSTSTOFFVERARBEITUNG diskutiert Weiß (2016) unterschiedliche Energieeffizienzmaßnahmen im Bereich der Querschnittstechnologien in der kunststoffverarbeitenden Industrie und quantifiziert auf Basis einer Literatursichtung mögliche Energieeinsparpotenziale einzelner Energieeffizienzmaßnahmen. Dabei werden unter anderem Energieeffizienzmaßnahmen im Bereich der Kälteversorgung, bspw. die freie Kühlung, sowie der Druckluftversorgung, bspw. das Beseitigen von Leckagen und die Drehzahlregelung, hervorgehoben. Eine Potenzialanalyse ist nicht Teil der Arbeit (Weiß 2016).

Neben den unterschiedlichen nationalen Berichten existieren diverse Studien und Berichte mit internationalem Fokus, die sich ebenfalls mit der Analyse der technischen und wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenziale von Querschnittstechnologien befassen. So beziffern McKane und Hasanbeigi (2011) das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial von Pumpensystemen mit 30 %, von Druckluftsystemen mit 28 % und von Ventilatorsystemen mit 28 %, jeweils für die Europäische Union. Die United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) bewertet das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial von Pumpensystemen in der EU im Jahr 2008 mit 30 % und das technische Endenergieeinsparpotenzial mit 44 %. Im Bereich der Druckluft werden das wirtschaftliche und das technische Endenergieeinsparpotenzial mit 28 % respektive 38 % bewertet. Für Ventilatorsysteme werden ein wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial von 28 % und ein technisches Endenergieeinsparpotenzial von 29 % ermittelt (UNIDO 2010). Ebenfalls für den Bilanzraum Europa beziffern Radgen und Blaustein (2001) das technische Endenergieeinsparpotenzial von Druckluftkompressoren mit 33 % und Radgen (2002) bewertet das technische Endenergieeinsparpotenzial von Ventilatoren mit 20–25 %.

Zusammenfassend bewegen sich die Ergebnisse der durchgeführten Potenzialanalyse im Wertebereich der zuvor dargestellten Studien. Im Bereich der Kälteversorgung überschreitet das identifizierte wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial das in der Literatursichtung ermittelte wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial. Das vergleichsweise hohe berechnete wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial ist vermutlich auf die Potenziale der freien Kühlung in der kunststoffverarbeitenden Industrie zurückzuführen. Eine tiefergehende Analyse ist mangels Dokumentation der Rahmenannahmen und methodischen Vorgehensweise in dena (2010b) an dieser Stelle nicht möglich.

6.4 Sensitivitätsanalyse

Ziel der Sensitivitätsanalyse ist die Bewertung der Robustheit der Ergebnisse der Potenzialanalyse gegenüber Unsicherheiten in der Parameterdefinition bezogen auf das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial. Es erfolgt zunächst eine übergreifende Analyse der Ergebnisse für die sechs charakteristischen Typbetriebe. Anschließend werden einige ausgewählte Effekte am Beispiel eines Typbetriebs dargestellt. Tabelle 6-12 fasst die Korrelation⁶⁶ zwischen dem kalkulatorischen Zinssatz, dem Energieträgerpreis und der Energieträgerpreisentwicklung jeweils

⁶⁶ Der Korrelationskoeffizient bietet die Möglichkeit, den linearen Zusammenhang zwischen zwei Variablen – in diesem Fall zwischen dem wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzial und einem der variierten Parameter – zu bewerten. Der Korrelationskoeffizient $r_{i,j} \in \{\mathbb{R} | -1, \dots, +1\}$ ist für den Wertebereich der reellen Zahlen zwischen -1 bis +1 definiert. Für einen Korrelationskoeffizienten > 0 besteht ein positiver und für Werte < 0 ein negativer Zusammenhang. Je näher sich der Korrelationskoeffizient dem Wert ± 1 annähert, desto größer ist der positive bzw. negative lineare Zusammenhang zwischen den zwei untersuchten Variablen. Nimmt der Korrelationskoeffizient den Wert 0 an, besteht kein linearer Zusammenhang zwischen den untersuchten Variablen.

im Bezug zum wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzial zusammen. Für den kalkulatorischen Zinssatz wird eine stark negative Korrelation im Wertebereich von -0,867 bis -0,997 ermittelt. Der kalkulatorische Zinssatz bewertet unter anderem die Investitionsrisiken und hat direkten Einfluss auf die wirtschaftliche Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen. Ein steigender kalkulatorischer Zinssatz führt zu einem reduzierten wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzial. Ein divergierender Zusammenhang ist für die Energieträgerpreise festzustellen. Hier liegt eine stark positive Korrelation im Wertebereich von 0,885 bis 1,000 vor. Mit steigenden Energieträgerpreisen wächst der monetäre Wert einer Energieeinsparung. Dies führt ceteris paribus zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit der Energieeffizienzmaßnahmen und somit zu einem höheren wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzial. Der Grad der Korrelation des kalkulatorischen Zinses sowie der Energieträgerpreise, jeweils im Bezug zum wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzial, ist in der Höhe nahezu identisch. Ein vergleichbares Ergebnis erzielten Brunke und Blesl (2014a) bei der Bewertung der Endenergieeinsparpotenziale in der deutschen Stahlindustrie. Hier wurde eine Korrelation zwischen dem wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzial und dem kalkulatorischen Zinssatz von -0,95 sowie den Energieträgerpreisen und dem wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzial von 0,89 ermittelt (Brunke und Blesl 2014a).

Tabelle 6-12: Korrelation der im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersuchten Parameter mit dem wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzial für die Typbetriebe der kunststoffverarbeitenden Industrie

Parameter	Korrelationskoeffizient [-]					
	Typ1	Typ2	Typ3	Typ4	Typ5	Typ6
Kalkulatorischer Zins	-0,906	-0,946	-0,892	-0,867	-0,997	-0,897
Energieträgerpreise	0,897	0,882	0,885	1,000	0,931	0,943
Energieträgerpreisentwicklung	0,898	-	-	0,866	-	0,866
- Keine Abweichung des wirtschaftlichen Energieeinsparpotenzials.						

Ein anderes Bild zeichnet sich für die Entwicklung der Energieträgerpreise ab. Hier liegt für drei Typbetriebe eine stark positive Korrelation im Wertebereich von 0,866 bis 0,898 vor, während für die übrigen drei Typbetriebe das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial durch die Variation der Energieträgerpreisentwicklung um $\pm 25\%$ im Vergleich zum Trendszenario nicht beeinflusst wird. Der Grad der Korrelation der Energieträgerpreisentwicklung ist im Vergleich zu den Energieträgerpreisen sowie dem kalkulatorischen Zinssatz als geringfügig niedriger einzustufen.⁶⁷

⁶⁷ Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird die Energieträgerpreisentwicklung um $\pm 25\%$ variiert. Zwar tritt für diesen Wertebereich bei drei der sechs Typbetrieben keine Veränderung des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials auf, dies deutet jedoch lediglich darauf hin, dass diese drei Typbetriebe weniger sensitiv auf Änderungen der Energieträgerpreisentwicklung reagieren. Würde die Energieträgerpreisentwicklung weiter erhöht, bspw. auf $+50\%$, so würde sich auch für diese Typbetriebe das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial verändern.

Im Folgenden wird exemplarisch auf die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 2 zur Herstellung von Folien eingegangen. Weiterführende Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die übrigen Typbetriebe sind in Anhang C (Abbildung C-8 bis Abbildung C-13, S. 214 ff.) dargestellt. Abbildung 6-19 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in Form einer Energieeinsparungskostenkurve jeweils im Vergleich zum Trendszenario. Den größten Einfluss auf das identifizierte wirtschaftlich realisierbare Endenergieeinsparpotenzial weist die Variation der Energieträgerpreise auf. Für den Typbetrieb 2 führt ein Anstieg der Energieträgerpreise um 25 % zu einem Anstieg des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials um 10,7 MWh bzw. 0,9 %. Eine Reduktion der Energieträgerpreise um 25 % hat ein um 265,5 MWh bzw. 21,2 % reduziertes wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial zur Folge. Diese Abweichung ist vor allem auf die Wärmerückgewinnung zur Raumwärmebereitstellung (HT06) zurückzuführen. Eine Reduktion der Energieträgerpreise um 25 % führt zu einem Anstieg der spezifischen Energieeinsparkosten von -4,7 EUR₂₀₁₅/MWh auf 3,1 EUR₂₀₁₅/MWh.

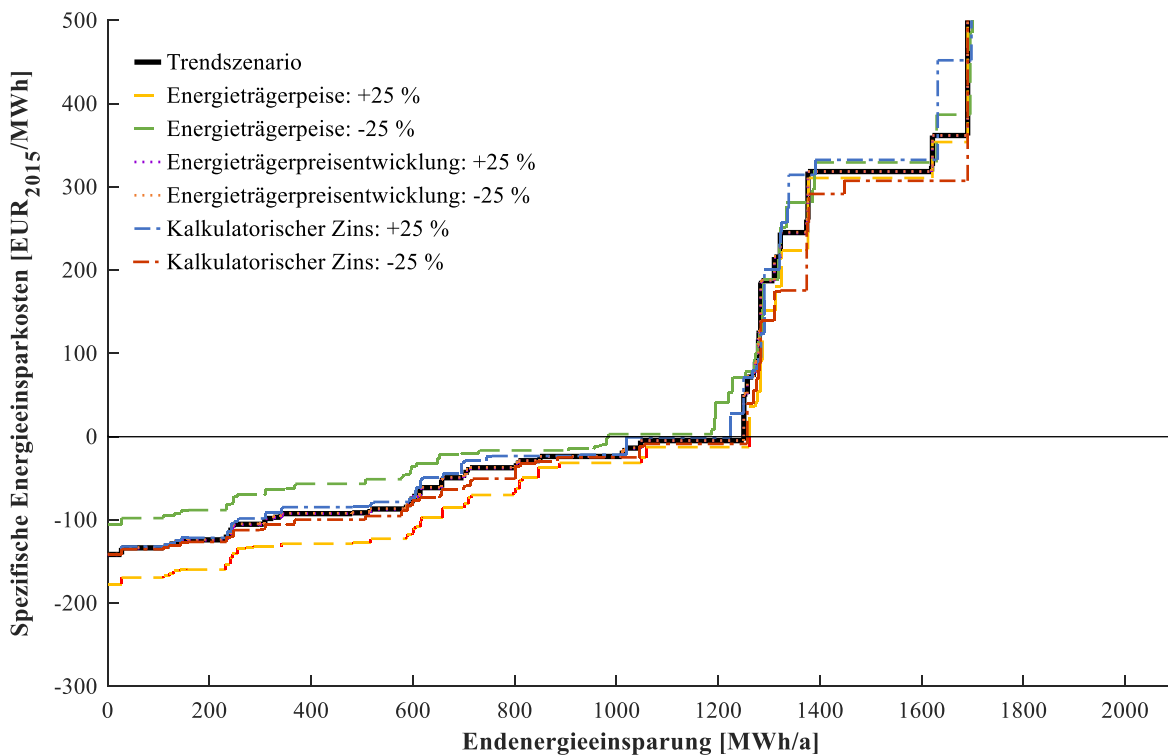


Abbildung 6-19: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 2 zur Herstellung von Folien durch Schlauch- und Flachfolienextrusion in Deutschland im Jahr 2015 im Vergleich zum Trendszenario

Wird der kalkulatorische Zinssatz *ceteris paribus* von 15 % auf 18,75 % angehoben, reduziert sich das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial um 26,9 MWh bzw. 2,2 %. Eine Reduktion des kalkulatorischen Zinssatzes auf 11,25 % hat ein 7,1 MWh bzw. 0,6 % höheres wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial zur Folge. Entsprechend führt ein um 1,00 Prozentpunkte höherer kalkulatorischer Zinssatz zu einem um 0,57 Prozentpunkte niedrigeren wirt-

schaftlichen Endenergieeinsparpotenzial. Wird der kalkulatorische Zinssatz um 1,00 Prozentpunkte reduziert, hat dies ein um 0,15 Prozentpunkte höheres wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial zur Folge. Im Zuge der zuvor durchgeführten Analyse der Korrelationskoeffizienten wurde festgestellt, dass eine Variation der Energieträgerpreise für drei der untersuchten Typbetriebe keinen Einfluss auf das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial aufweist. Dies ist unter anderem für den Typbetrieb 2 der Fall (s. Tabelle 6-12 sowie Abbildung 6-19).

Tabelle 6-13 fasst die beschriebenen Ergebnisse für die erzielbare jährliche Kostenreduktionen des Typbetriebs 2 zusammen. So wird durch die Umsetzung aller im Trendszenario als wirtschaftlich identifizierten Energieeffizienzmaßnahmen eine jährliche Kostenreduktion von 81.199 EUR_{2015/a} erzielt (vgl. Tabelle 6-11, S. 126). Durch eine Variation der Energieträgerpreise um ± 25 % kommt es zu einer jährlichen Kostenreduktion in Höhe von 114.183 bzw. 50.847 EUR_{2015/a}. Eine Variation des kalkulatorischen Zinssatzes um ± 25 % führt zu einer jährlichen Kostenreduktion von 74.458 bzw. 88.739 EUR_{2015/a}. Dieser Zusammenhang ist auch Abbildung 6-19 zu entnehmen. Das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial entspricht dem Schnittpunkt der unterschiedlichen Linien der Varianten mit der Abszisse. Die jährliche Kostenreduktion entspricht der zwischen Abszisse, negativer Ordinate sowie den unterschiedlichen Linien der Varianten eingespannten Fläche.

Tabelle 6-13: Endenergieeinsparpotenzial und Energiekostenreduktion des Typbetriebs 2 für das Trendszenario sowie die Sensitivitäten

	Einheit	Trend	Energieträgerpreise		Energieträgerpreisentwicklung		Kalkulatorischer Zinssatz	
			+25 %	-25 %	+25 %	-25 %	+25 %	-25 %
Jährliche Kostenreduktion ¹⁾	EUR _{2015/a}	81.199	114.183	50.847	81.661	80.739	74.458	88.739
Abweichung Trend ²⁾	EUR _{2015/a}	-	32.984	-30.352	462	-460	-6.741	7.540
Abweichung Trend ³⁾	%	-	40,6	-37,4	0,6	-0,6	-8,3	9,3

¹⁾ Jährliche Kostenreduktion (Produkt aus spezifischen Energieeinsparkosten und Endenergieeinsparung einer Energieeffizienzmaßnahme) bei Umsetzung aller im Rahmen des Trendszenarios bzw. der jeweiligen Parametervariation als wirtschaftlich identifizierten Energieeffizienzmaßnahmen (SEEK < 0 EUR_{2015/MWh}). Ergebnisse Trendszenario s. Anhang C (Tabelle C-1 und Tabelle C-2, S. 190 ff.). Vgl. Tabelle 6-11, S. 126.

²⁾ Abweichung der jährlichen Kostenreduktion vom Ergebnis im Trendszenario.

³⁾ Prozentuale Abweichung der jährlichen Kostenreduktion vom Ergebnis im Trendszenario.

SEEK Spezifische Energieeinsparkosten

Die Energieeffizienzmaßnahmen mit dem größten Endenergieeinsparpotenzial, die sich an der Grenze zur Wirtschaftlichkeit befinden, sind die Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung aus Druckluftanlagen (HT05) respektive Kälteanlagen (HT06). Für den Typbetrieb 2 zur Herstellung von Folien schwanken die spezifischen Energieeinsparkosten je nach Parametervariation im Wertebereichen von -31,4 bis -16,5 EUR_{2015/MWh} für die Wärmerückgewinnung aus Druckluftanlagen bzw. -12,5 bis 3,1 EUR_{2015/MWh} für die Wärmerückgewinnung aus Kälteanlagen. Im Trendszenario betragen die spezifischen Energieeinsparkosten -23,7 respektive -4,7 EUR_{2015/MWh}.

Mit Blick auf die Struktur der Energieeinsparkostenkurve ist festzustellen, dass eine Parametervariation für den im Rahmen dieser Arbeit gewählten methodischen Ansatz keineswegs zu einer Parallelverschiebung der Energieeinsparkostenkurve entlang der Abszisse führt, wie es bspw. in Fleiter et al. (2012) im Rahmen einer Analyse der Energieeinsparpotenziale in der deutschen Papierindustrie mit dem technologieorientierten Bottom-up-Modell IS Industry dargestellt wurde. Gründe für Änderungen in der Struktur der Energieeinsparkostenkurve sind sowohl auf Änderungen in der Auswahl und Reihenfolge der umgesetzten Energieeffizienzmaßnahmen als auch auf die damit verbundenen Wechselwirkungen zu nachgelagerten Prozessen (bspw. dem Raumwärmebedarf) zurückzuführen.

7 Abschließende Betrachtung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde mittels qualitativer und quantitativer Analysen der Einfluss interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen bei der Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen untersucht. Dabei sollte die in Abschnitt 1.2 formulierte Leitfrage beantwortet werden:

Welche Rolle spielt die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen bei der Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen im industriellen Kontext?

Zur Beantwortung dieser Leitfrage wurden drei Ziele formuliert. Die Ziele I und II widmen sich methodischen Aspekten bei der Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen. Dies umfasst einerseits die Analyse und Bewertung bestehender Verfahren zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen sowie andererseits die Entwicklung und Bewertung eines alternativen Verfahrens zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen (integrierte Bewertung). Im Gegensatz dazu hat das Ziel III einen anwendungsorientierten Fokus. Es wurde das entwickelte Verfahren zur integrierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen für Querschnittstechnologien am Beispiel der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland angewandt. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und Schlussfolgerungen mit Blick auf die Leitfrage sowie die daraus abgeleiteten Ziele diskutiert. Dabei wird in Abschnitt 7.1 zunächst auf die methodischen Aspekte und anschließend in Abschnitt 7.2 auf die Ergebnisse der Szenarioanalyse für Querschnittstechnologien in der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland eingegangen. In Abschnitt 7.3 folgt ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf. Abschließend werden in Abschnitt 7.4 in einem (persönlichen) Schlusswort zentrale Erkenntnisse der durchgeführten Arbeit formuliert.

7.1 Methodische Weiterentwicklungen

Ziel I dieser Arbeit waren die Identifikation bestehender Limitierungen bei der Bewertung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen sowie die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur integrierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen. Vor diesem Hintergrund erfolgten zunächst eine umfangreiche Literaturanalyse sowie darauf aufbauend eine Diskussion der **Limitierungen bisheriger Bewertungsverfahren**. Mit Blick auf die Quantifizierung des Energieeinsparpotenzials einer Energieeffizienzmaßnahme konnte festgestellt werden, dass bei der modelltechnischen Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen unterschiedliche Vereinfachungen getroffen werden. So wird das Energieeinsparpotenzial typischerweise kennzahlenbasiert durch eine Reduktion der Energieintensität oder einen Prozentwert berechnet. Dies führt ceteris paribus zu einem linearen Zusammenhang zwischen dem

Energieverbrauch des Referenzsystems und dem Energieeinsparpotenzial einer Energieeffizienzmaßnahme. Nicht lineare Zusammenhänge werden zugunsten einer geringeren Modellkomplexität zumeist vernachlässigt. Ebenso werden Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen entweder gänzlich vernachlässigt (Einzelbewertung) oder anhand von zwei unterschiedlichen Approximationsalgorithmen abgeschätzt. Diese sind der Einsatz von paarweisen Korrekturfaktoren sowie die sequenzielle Bewertung. Dabei wird in der Regel der Einsatz von paarweisen Korrekturfaktoren mit einer Energieintensitätsreduktion und die sequenzielle Bewertung mit einem prozentualen Energieeinsparpotenzial (statisch-faktorielle Bewertung) kombiniert. Strategische sowie technische Restriktionen mit Blick auf die Umsetzungsreihenfolge werden überwiegend vernachlässigt. Mit Blick auf die sequenzielle Bewertung führt die identifizierte Umsetzungsreihenfolge nicht immer zum optimalen Investitionsplan.

Deshalb wurde ein Verfahren zur **integrierten Bewertung** von Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt und für Querschnittstechnologien in Form eines Energienachfragemodells umgesetzt. Das Verfahren folgt einem modellbasierten Ansatz. Es wird ein technologieorientierter Bottom-up-Ansatz mit einem heuristischen Optimierungsalgorithmus zur Identifikation einer (nahezu) kostenoptimalen Maßnahmenpermutation kombiniert. Dabei wird eine modular-hierarchische Modellstruktur verwendet. Zur mathematischen Beschreibung der Technologiemodule werden deterministische Greybox-Modelle mit nichtlinearer Programmierung eingesetzt. Diese wurden durch 2.415 Einzelparametervariationen plausibilisiert. Die Berechnung des Energieeinsparpotenzials einer Energieeffizienzmaßnahme erfolgt modellendogen. Zielgröße der heuristischen Optimierung ist die Ertragsmaximierung. Diese beruht auf einer partiellen Iteration aller möglichen Maßnahmenpermutationen. Im Gegensatz zur sequenziellen Bewertung werden dabei technische und strategische Überlegungen berücksichtigt. Dadurch werden technisch nicht sinnvolle oder unwirtschaftliche Permutationen vorzeitig eliminiert. Durch die Heuristik erfolgt eine möglichst gute Annäherung an das ökonomisch optimale System. Das entwickelte Energienachfragemodell ermöglicht zudem die adäquate Berücksichtigung der heterogenen Ausprägung des Anlagenbestands, der unterschiedlichen Lastzustände einzelner Verbraucher und der damit verbundenen dynamischen Effekte sowie der Wechselwirkungen zwischen Technologien und Energieeffizienzmaßnahmen.

Ziel II dieser Arbeit war die quantitative Analyse der Eignung sowohl für die diskutierten Bewertungsverfahren als auch für das entwickelte Verfahren zur integrierten Bewertung im Hinblick auf die Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen. Dies erfolgte jeweils am Beispiel von Querschnittstechnologien. Zur Quantifizierung der mit den vorgestellten Methoden einhergehenden Fehler wurde eine vergleichende Analyse durchgeführt. Dazu wurden zunächst 720 unterschiedliche Varianten für die betrachteten Querschnittstechnologien definiert, die sich hinsichtlich Lastprofil, Technologiedimensionierung und Regelungskonzepten unterscheiden. Je Variante wurden drei bis sechs interdependente Energieeffizienzmaßnahmen bewertet. Alle Varianten wurden mit der Einzelbewertung, der statisch-faktoriellen Bewertung

sowie der integrierten Bewertung berechnet. Als Referenz für die Bewertung der Ergebnisgüte wurden zudem durch die vollständige Enumeration (engl. *brute-force search*) die tatsächlich optimalen Ergebnisse identifiziert.

Mit Blick auf die **Einzelbewertung** wurde festgestellt, dass lediglich für jede fünfte Variante die ökonomisch optimale jährliche Gesamtkostenänderung identifiziert wurde. Der mittlere methodische Fehler – d. h. der Mittelwert der Abweichung vom ökonomisch optimalen System – beträgt etwa 15 %. Diese Abweichung ist auf die Vernachlässigung der Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen und die damit einhergehende fehlerhafte Bewertung der Endenergieeinsparpotenziale der Energieeffizienzmaßnahmen zurückzuführen. Auf Ebene einzelner Energieeffizienzmaßnahmen bzw. Technologien sind die Abweichungen deutlich höher. Tendenziell kommt es durch die Einzelbewertung zu einer Überschätzung des Potenzials, wobei in einigen Varianten auch eine Potenzialunterschätzung auftritt. Zusammenfassend konnte mit Blick auf die Frage zur Rolle von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen bei der Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen gezeigt werden, dass ein Verzicht auf die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen zu signifikanten Fehlbewertungen bei der Quantifizierung von Energieeffizienzpotenzialen für Querschnittstechnologien führt. Zwar wurde die quantitative Analyse ausschließlich für Querschnittstechnologien durchgeführt, dennoch dürfte ein Verzicht auf die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen auch für Prozesstechnologien zu deutlichen Fehlern bei der Potenzialanalyse führen.

Für die **statisch-faktorielle Bewertung** wurde festgestellt, dass die Fehlerhäufigkeit – d. h. die Anzahl der Varianten, in denen nicht das optimale System identifiziert wurde – nahezu identisch mit der Einzelbewertung ist. Demgegenüber war der mittlere methodische Fehler der Einzelbewertung etwa um das Dreifache größer als bei der statisch-faktoriellen Bewertung. Auch konnte gezeigt werden, dass es neben der Einzelbewertung auch durch die statisch-faktorielle Bewertung überwiegend zu einer Potenzialüberschätzung kommt. Zusammenfassend ist mit Blick auf die Eignung der statisch-faktoriellen Bewertung zur Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen eine differenzierte Beurteilung erforderlich. Einerseits wurde am Beispiel von Querschnittstechnologien gezeigt, dass der mittlere methodische Fehler der statisch-faktoriellen Bewertung vergleichsweise gering ist. Folglich scheint diese Methode zur aggregierten Analyse von Energieeffizienzpotenzialen für Querschnittstechnologien geeignet. Andererseits wurde festgestellt, dass die Abweichungen für einzelne Energieeffizienzmaßnahmen auch bei der statisch-faktoriellen Bewertung deutlich über 50 % betragen können. Damit konnte die Hypothese von Brunke (2017), es käme durch die bestehenden Bewertungsverfahren zu deutlichen Abweichungen insbesondere auf Ebene einzelner Energieeffizienzmaßnahmen, am Beispiel von Querschnittstechnologien quantitativ bestätigt werden. Maßnahmenspezifische Ergebnisse einer Potenzialanalyse, die mit der statisch-faktoriellen Bewertung ermittelt wurden, sind somit zumindest kritisch zu hinterfragen.

Hinsichtlich der **integrierten Bewertung** zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Analysen, dass sowohl der mittlere methodische Fehler als auch die Fehlerhäufigkeit – jeweils im Vergleich zur Einzelbewertung bzw. zur statisch-faktoriellen Bewertung – vernachlässigbar gering sind. Im Gegensatz zur Einzelbewertung sowie der statisch-faktoriellen Bewertung führt die integrierte Bewertung eher zu einer Potenzialunterschätzung. Bezüglich der Eignung des entwickelten Verfahrens zur integrierten Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen kann anhand der durchgeführten Variantenrechnungen darauf geschlossen werden, dass dieses eine deutliche Verbesserung mit Blick auf die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen bei der Bewertung von Querschnittstechnologien darstellt. Zwar gilt dies unter der Einschränkung, dass die quantitativen Analysen ausschließlich für drei bis sechs interagierende Energieeffizienzmaßnahmen durchgeführt wurden, dennoch scheint die Hypothese hinreichend plausibel, dass die integrierte Bewertung auch für mehr als sechs interdependente Energieeffizienzmaßnahmen eine geringe Fehlerhäufigkeit gepaart mit einem geringen mittleren methodischen Fehler aufweist. Aufgrund des erforderlichen Rechenaufwands bei der vollständigen Enumeration ist dies jedoch nur begrenzt quantitativ belegbar. Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass mit dem Verfahren zur integrierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen eine Methode entwickelt wurde, die akkurate und plausible Ergebnisse liefert und im Gegensatz zur statisch-faktoriellen Bewertung auch robuste Aussagen auf Einzelmaßnahmenebene erlaubt.

Tabelle 7-1 fasst die Vor- und Nachteile der diskutierten Bewertungsverfahren zusammen.

Tabelle 7-1: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der untersuchten Bewertungsverfahren

	Einzelbewertung	Statisch-faktorielle Bewertung	Integrierte Bewertung
Vorteile	Geringer Ressourcenaufwand (Modellierung, Rechenzeit etc.) Vergleichsweise einfache Anwendung möglich Informationen zur Energie- und Kosteneffizienz einer einzelnen Energieeffizienzmaßnahme	Geringer Ressourcenaufwand (Modellierung, Rechenzeit etc.) Vergleichsweise einfache Anwendung (bspw. in Spreadsheet-Modell) möglich Wechselwirkungen zwischen EEM werden in abstrahierter Form berücksichtigt Möglichkeit zur aggregierten Analyse von EEP mit vergleichsweise geringem Fehler	Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen EEM Heuristische Optimierung ermöglicht Auswahl der (nahezu) kostenoptimalen Maßnahmen-permutation Plausible Ergebnisse zur Energie- und Kosteneffizienz interdependenter EEM Plausible Ergebnisse zu aggregierten EEP interdependenter EEM
Nachteile	Keine Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen EEM und Technologien Keine Aussagen zu bestehenden (kumulierten) EEP sinnvoll	Abstraktion von Wechselwirkungen führen zu Fehlern auf Ebene individueller EEM Auch die aggregierten EEP werden tendenziell überschätzt	Möglicherweise stehen die benötigten Daten nicht im erforderlichen Detail zur Verfügung. Höherer Ressourcenaufwand (Modellierung, Rechenzeit etc.) Ergebnis abhängig von Fähigkeiten des Anwenders
EEM	Energieeffizienzmaßnahme		
EEP	Energieeffizienzpotenzialen		

7.2 Energieeffizienzpotenziale für Querschnittstechnologien in der Kunststoffverarbeitung

Ziel III der Arbeit war die Anwendung des entwickelten Verfahrens zur integrierten Bewertung im Rahmen einer Potenzialanalyse für Querschnittstechnologien am Beispiel der kunststoffverarbeitenden Industrie. Dazu wurde das entwickelte Energienachfragemodell für die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland angewandt. Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Produktionsprozesse in der Kunststoffverarbeitung wurden sechs charakteristische Typbetriebe definiert, die die wesentlichen Produktgruppen der kunststoffverarbeitenden Industrie abbilden (Stangen und Rohre, Folien, Verpackungen, Flaschen, Baubedarf, technische Teile). Jeder Typbetrieb ist durch einen individuellen, prozessspezifischen Technologiebestand charakterisiert. Im Rahmen einer Szenarioanalyse wurden die durch eine gesteigerte Energieeffizienz erschließbaren Endenergieeinsparpotenziale zunächst auf Ebene der Typbetriebe ermittelt und anschließend auf Deutschland extrapoliert. Im Trendszenario wurde dabei ein **wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial** von etwa 11,6 % identifiziert (bezogen auf den Endenergieverbrauch der betrachteten Querschnittstechnologien). Zu den wirtschaftlichsten Energieeffizienzmaßnahmen zählt im Trendszenario der Einsatz der freien Kühlung. Neben der freien Kühlung ist ein großes Endenergieeinsparpotenzial im Bereich der Wärmerückgewinnung aus Druckluft- und Kälteanlagen vorzufinden. Dabei variiert die Wirtschaftlichkeit der Wärmerückgewinnung in Abhängigkeit der betrachteten Typbetriebe. Die Robustheit der Ergebnisse der Potenzialanalyse gegenüber Änderungen der ökonomischen Rahmenannahmen wurde im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Den größten Einfluss auf das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial haben die Wahl des kalkulatorischen Zinssatzes sowie die Energieträgerpreise. Durch eine Variation der Energieträgerpreisentwicklung kommt es lediglich für drei der sechs Typbetriebe zu einer Veränderung des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials. Mit Blick auf den Einfluss von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen konnte gezeigt werden, dass das wirtschaftliche Endenergieeinsparpotenzial im Trendszenario um etwa ein Drittel im Vergleich zur Einzelbewertung überschätzt wird.

Zusammenfassend konnte für Querschnittstechnologien in der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland gezeigt werden, dass noch ein relevantes wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial vorliegt. Dabei zeigen die Ergebnisse, dass ein Großteil des wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials im Bereich der Produktion vorzufinden ist. Vor allem die Optimierung der Kälteversorgung bietet erhebliche Energieeffizienzpotenziale. Im Rahmen der durchgeführten Potenzialanalyse konnte speziell die freie Kühlung als ‚no-regret-Maßnahme‘

identifiziert werden.⁶⁸ Energieeffizienzmaßnahmen im Bereich der Raumwärme sind hingegen wirtschaftlich nicht darstellbar. Große technische Endenergieeinsparpotenziale bieten hier insbesondere Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung aus Druckluft- und Kälteanlagen. Die Wirtschaftlichkeit variiert aber in Abhängigkeit der Typbetriebe, sodass hier individuelle Analysen erforderlich sind, um die Wirtschaftlichkeit im konkreten Anwendungsfall zu bestätigen. Bezüglich der Bedeutung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen wurde gezeigt, dass diese zumeist einen negativen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Energieeffizienzmaßnahme haben, aber dennoch signifikante wirtschaftliche Energieeinsparpotenziale durch eine gesteigerte Energieeffizienz existieren. Die Ergebnisse der Arbeit verdeutlichen, dass bei der Auswahl und Zusammenstellung konkreter Energieeffizienzmaßnahmen ein ganzheitlicher Ansatz, bspw. das entwickelte Verfahren zur integrierten Bewertung, zur Analyse der (technischen und) wirtschaftlichen Energieeffizienzpotenziale gewählt werden sollte.

7.3 Weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen der durchgeführten Arbeit sind unterschiedliche Fragestellungen aufgetreten, die nicht Schwerpunkt dieser Arbeit waren, aber Potenzial für zukünftige Forschungsarbeiten bieten. Im Folgenden werden drei Anknüpfungspunkte für weitere Arbeiten skizziert.

Im Zuge der durchgeführten Potenzialanalyse wurden Energieeffizienzmaßnahmen für Querschnittstechnologien und Energieeffizienzmaßnahmen mit Querschnittscharakter am Beispiel der kunststoffverarbeitenden Industrie untersucht. Der Austausch der Produktionsprozesse, bspw. der Spritzgussanlagen, sowie der branchenspezifischen Peripherieprozesse, bspw. der Granulattrockner, wurde nicht betrachtet. Ein vorzeitiger Austausch dieser Produktionsanlagen ausschließlich aus Gründen der Energieeffizienz erscheint in der kunststoffverarbeitenden Industrie aufgrund der versunkenen Kosten⁶⁹ der Bestandsanlagen nicht realistisch. Für zukünftige Forschungsarbeiten stellt sich die Frage, welche Energieeffizienzpotenziale im Rahmen einer Langfristbetrachtung gehoben werden können, wenn ein Austausch der Prozesstechnologie am Ende der Nutzungsdauer, d. h. bei Neuinvestition, möglich ist.

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der Analysen für die kunststoffverarbeitende Industrie ein großes technisches Endenergieeinsparpotenzial durch eine gesteigerte Energieeffizienz in den Bereichen Kälte- und Raumwärmeversorgung sowie der Kopplung der Raumwärmeversorgung mit der Produktion durch Wärmerückgewinnung aus Druckluft- und Kälteanlagen. Während Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung bereits an der Grenze zur Wirtschaftlichkeit

⁶⁸ „No-regret-Maßnahmen zeichnen sich dadurch aus, dass sie – unabhängig vom Eintritt von Klimafolgen und dem Erreichen klimapolitischer Zielsetzungen – einen Nutzen haben, da sie kosteneffektiv sind und/oder dazu beitragen, Erfahrungswissen für zukünftige Anpassungsmaßnahmen zu gewinnen. Sie lassen sich unter allen Bedingungen begründen, d.h. auch dann, wenn der Klimawandel nicht eintritt“ (Beck et al. 2011 basierend auf Willows et al. 2003).

⁶⁹ An anderem Ort: Fußnote 35, S. 46.

stehen, sind insbesondere die Maßnahmen zur Energieeffizienz in der Raumwärmeversorgung Stand heute wirtschaftlich nicht realisierbar. Vor dem Hintergrund einer weiteren Dekarbonisierung industrieller Energieversorgungssysteme stellt sich die Frage, inwieweit sich eine Steigerung der Energieeffizienz durch eine gekoppelte Wärme-, Kälte- und Druckluftversorgung mit einer weiteren Integration des Wärme-, Kälte- und Stromsektors kostenoptimal kombinieren lässt.⁷⁰ In künftigen Forschungsarbeiten können durch eine systemische Gegenüberstellung der verfügbaren Technologieoptionen und Konkurrenztechnologien Wege zu einer (betriebswirtschaftlich) kostenoptimalen Dekarbonisierung industrieller Energieversorgungssysteme für unterschiedliche Dekarbonisierungsgrade aufgezeigt werden.

In diesem Zusammenhang bietet die ökologische Auswertung der durchgeführten Potenzialanalyse für die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland einen dritten Anknüpfungspunkt. Im Trendszenario wurden kumulierte CO₂-Emissionen in Höhe von ca. 5 Mio. t. CO₂/a ermittelt.⁷¹ Wird das identifizierte technische Energieeffizienzpotenzial in Gänze realisiert, werden die CO₂-Emissionen um etwa 10 % verringert. Wird weiterhin die Annahme getroffen, dass die deutsche Stromversorgung zukünftig vollständig auf fossile Energieträger verzichtet, können perspektivisch weitere 65 % der CO₂-Emissionen eingespart werden.⁷² Die somit verbleibenden jährlichen CO₂-Emissionen in Höhe von etwa 25 % entfallen im großen Maße auf die brennstoffbasierte (Raum-)Wärmeversorgung. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, durch welche Technologieoptionen (bspw. Wärmepumpen) diese verbleibenden Emissionen vermieden und durch welche regulatorischen Instrumente (bspw. durch die Ausweitung des CO₂-Zertifikatehandels oder die Einführung einer CO₂-Steuer) Investitionsanreize in eben diese Technologien volkswirtschaftlich optimal geschaffen werden können.

7.4 Schlusswort

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen bei der Ermittlung möglichst detaillierter Energieeffizienzpotenziale von hoher Bedeutung ist. Mit dem entwickelten Verfahren zur integrierten Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen wurde eine Methode entwickelt, die die adäquate Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen sowie die Auswahl einer (nahezu) kostenoptimalen Maßnahmenkombination ermöglicht. Bestehende Potenzialanalysen, die auf eine Berücksichtigung von Wechselwirkungen verzichten, müssen mit Blick auf die Eignung für die Entscheidungsfindung – sei es im industriellen oder

⁷⁰ Die Integration des Strom-, Wärme-, Kälte- und Verkehrssektors (häufig als Sektorkopplung bezeichnet) beschreibt das Ziel, zukünftig Strom aus erneuerbaren Energien zur Bereitstellung von anderen Energieformen zu nutzen, um auf fossile Energieträger zu verzichten (BMW 2016b).

⁷¹ Emissionsfaktoren aus Bubeck (2017): Elektrischer Strom = 517 g CO₂/kWh; Erdgas = 202 g CO₂/kWh.

⁷² Annahme: Emissionsfaktor von elektrischem Strom = 0 g CO₂/kWh.

politischen Kontext – deutlich infrage gestellt werden. Werden hingegen bestehende Approximationsalgorithmen zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen eingesetzt, sind die aggregierten Ergebnisse – im Bewusstsein der bestehenden methodischen Ungenauigkeiten – für die Entscheidungsfindung geeignet, während Aussagen auf Einzelmaßnahmenebene solange kritisch zu hinterfragen sind, bis diese durch detaillierte Analysen bestätigt wurden.

8 Literaturverzeichnis

- Ackoff, R. L.; Sasieni, M. W. (1968): *Fundamentals of operations research*. London: John Wiley.
- AEROTEC Kompressoren (2015): *Power System Air Compressors. Preisliste 2015|2016*. Hg. v. AEROTEC Kompressoren. Seligenstadt.
- AGEB (2013): *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012*. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Berlin.
- AGEB (2014): *Ausgewählte Effizienzindikatoren zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2013. (Endgültige Ergebnisse bis 2012 und vorläufige Indikatoren für 2013)*. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Berlin.
- AGEB (2017): *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2016*. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Berlin.
- AGEB (2018): *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2017*. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Berlin.
- AIRKO (2016): *Der Druckluft-Turbo. Für Handwerk, Gewerbe und Kleinindustrie*. Hg. v. AIRKO GmbH. Schiedlberg.
- Allcott, H.; Greenstone, M. (2012): *Is There an Energy Efficiency Gap*. In: *Journal of Economic Perspectives* 26 (1), S. 3–28. DOI: 10.1257/jep.26.1.3.
- Allweiler (2018): *Baureihe NB. Spiralgehäuse-Kreiselpumpe in Blockbauart bis PN10*. Hg. v. Allweiler GmbH. Online verfügbar unter http://www.allweiler.de/12248/Produkte/Produktkatalog/Kreiselpumpen/mit-Wellendichtung/Blockausfuehrung/NB/Produkt/awr_index_2017.aspx, zuletzt geprüft am 28.06.2018.
- Almeida, A. D.; Falkner, H.; Fong, J.; Jugdoyal, K. (2014): *EuP Lot 30: Electric Motors and Drives. ENER/C3/413-2010*. University of Coimbra; Atkins.
- Almeida, A. D.; Greenberg, S. (1995): *Technology assessment: energy-efficient belt transmissions*. In: *Energy and Buildings* 22 (3), S. 245–253. DOI: 10.1016/0378-7788(95)00926-O.
- Anderegg, W. R. L.; Harold, J.; Prall, J. W.; Schneider, S. H. (2010): *Expert credibility in climate change*. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (27), S. 12107–12109. DOI: 10.1073/pnas.1003187107.

- AREA (2016): 2016 Preisliste. Verdichter. Hg. v. AREA Cooling Solutions. Barcelona.
- Arens, M.; Worrell, E. (2014): Diffusion of energy efficient technologies in the German steel industry and their impact on energy consumption. In: *Energy* 73, S. 968–977. DOI: 10.1016/j.energy.2014.06.112.
- Arndt, J. (1967): Role of Product-Related Conversations in the Diffusion of a New Product. In: *Journal of Marketing Research* 4 (3), S. 291–295. DOI: 10.2307/3149462.
- Arrhenius, S. (1896): XXXI. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 41 (5), S. 237–276. DOI: 10.1080/14786449608620846.
- Arrow, K. J.; Debreu, G. (1954): Existence of an equilibrium for a competitive economy. In: *ECONOMETRICA* 22 (4), S. 265–290. DOI: 10.2307/1907353.
- Assoumou, E.; Maizi, N. (2011): Carbon value dynamics for France: A key driver to support mitigation pledges at country scale *Energy Policy* (39), S. 4325–4336.
- Augenstein, E. M. G. (2009): Rechnergestützte Analyse und Konzeption industrieller Energiesysteme. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen. Fakultät für Maschinenwesen.
- Baehr, H. D.; Kabelac, S. (2012): *Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen*. 15., Aufl. 2012. Berlin: Springer Berlin (Springer-Lehrbuch).
- Baine, R. L. (2018): Thermal Applications Note: Polymer Melts of Fusion. Hg. v. TA Instruments. Online verfügbar unter <http://www.tainstruments.com/pdf/literature/TN048.pdf>, zuletzt geprüft am 17.08.2018.
- Barthelme (2015): LED Solutions 2015 - Preisliste. Hg. v. Josef Barthelme GmbH & Co. KG. Nürnberg.
- Bauernhansl, T. (Hg.) (2014): *Energieeffizienz in Deutschland - eine Metastudie. Analyse und Empfehlungen*. Unter Mitarbeit von T. Bauernhansl, J. Mandel, S. Wahren, R. Kaspro-wics und R. Mieke. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- BDEW (2015): *Primärenergiefaktoren. Der Zusammenhang von Primärenergie und Endener-gie in der energetischen Bewertung*. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirt-schaft e. V. (BDEW). Berlin.
- BDEW (2018): *Erdgasbetriebene Warmluftheizungen. Effiziente Beheizung für Hallen im Ge-werbe*. Hg. v. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. Berlin.

- Beck, S.; Bovet, J.; Baasch, S.; Reiß, P.; Görg, C. (2011): Synergien und Konflikte von Anpassungsstrategien und -maßnahmen. Förderkennzeichen (UFOPLAN) (FKZ 3709 41 126). Hg. v. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ im Auftrag des Umweltbundesamts. Leipzig.
- Beer, M.; Corradini, R.; Gobmaier, T.; Köll, L.; Podhajsky, R.; Vogler, G. Zotz, M. (2009): CO₂-Verminderung in Deutschland. Teil I - Methodik und Zusammenfassung. 2., überarb. Aufl. Hg. v. Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) im Auftrag von EnBW, E.ON Energie, RWE Power und Vattenfall Europe. München.
- Beestermöller, R. (2017): Die Energienachfrage privater Haushalte und ihre Bedeutung für den Klimaschutz. Volkswirtschaftliche Analysen zur deutschen und europäischen Klimapolitik mit einem technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodell. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Behrendt, S.; Erdmann, L. (2010): Querschnittstechnologien. Innovationssprünge für Ressourceneffizienz. Hg. v. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) gGmbH im Auftrag von ZRE VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH. Berlin.
- Berger, H.; Bachmann, G.; Cremer, P.; Dechant, A.; Eisenhut, T.; Kollegger, A. et al. (2005): Energieeffiziente Technologien und effizienzsteigernde Maßnahmen. Praxiserprobte Anwendungen und Innovationen. Wien.
- Bertrand, A.; Hervieu, J. (2012): Energy Audit Summary Report CRP HENRI TUDOR (Audit no. 63 - LU03) - Plastic injection. EINSTEIN - II. Hg. v. Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement. Intelligent Energy Europe; European Commission. Online verfügbar unter http://www.einstein-energy.net/images/uploads/AuditSummaries/EINSTEIN_audit_summaryreport_63.pdf, zuletzt aktualisiert am 17.08.2018.
- BGVZ (2015): Preis-Leistungs-Verhältnis. Gewichtsreduktion BGVZ. Hg. v. Bund Getränkeverpackungen der Zukunft. Arbeitsgemeinschaft konsumenten- und ökologieorientierte Getränkeverpackungen e. V. (AKÖG); Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu). Online verfügbar unter <https://www.bgvz.de/downloads/pdfs/Preis-LeistungsVerhaeltnis-Gewichtsreduktion-BGVZ.pdf>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2018.
- Binder, A. (2012): Elektrische Maschinen und Antriebe. Grundlagen, Betriebsverhalten. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- Blanford, J.; Richard, G.; Geoffrey, R. (2008): The value of technological advance in decarbonizing the U.S. economy (30), S. 2930–2946.
- Blesl, M.; Kessler, A. (2013): Energieeffizienz in der Industrie. 1. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.

- Blesl, M.; Kessler, A. (2017): *Energieeffizienz in der Industrie*. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.
- Blum, C.; Roli, A. (2003): Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. In: *ACM Computing Surveys* 35 (3), S. 268–308. DOI: 10.1145/937503.937505.
- BMU (2009): *Energieeffizienz - Die intelligente Energiequelle. Tipps für Industrie und Gewerbe*. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin.
- BMU (2013): *Projektionsbericht 2013 gemäß Entscheidung 280/2004/EG*. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin.
- BMWi (2010): *Energieeffizienz - Made in Germany. Energieeffizienz im Bereich Industrie, Gebäudeanwendungen und Verkehr*. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Berlin.
- BMWi (2014): *3. Nationaler Energieeffizient-Aktionsplan (NEEAP= 214 der Bundesrepublik Deutschland gemäß der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz (2012/27/EU). NEEAP*. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Berlin.
- BMWi (2016a): *Grünbuch Energieeffizienz. Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Berlin.
- BMWi (2016b): *Was bedeutet "Sektorkopplung"?* Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter <https://www.bmwi-energie-wende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2016/14/Meldung/direkt-erklaert.html>, zuletzt aktualisiert am 27.08.2018.
- BMWi (2017): *Grünbuch Energieeffizienz. Auswertungsbericht zur öffentlichen Konsultation*. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Berlin.
- BMWi (2018): *Die Energie der Zukunft. Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende (Berichtsjahr 2016)*. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Berlin.
- Boden, T.; Andres, R.; Marland, G. (2017): *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions (1751 - 2014) (V. 2017)*. Oak Ridge National Laboratory; Appalachian State University, Boone, NC.
- Böhringer, C.; Rutherford, T. F. (2008): Combining bottom-up and top-down. In: *Energy Economics* 30 (2), S. 574–596. DOI: 10.1016/j.eneco.2007.03.004.

- Böhringer, C.; Wiegard, W. (2018): Methoden der angewandten Wirtschaftsforschung: Eine Einführung in die numerische Gleichgewichtsanalyse. Hg. v. Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH. Online verfügbar unter <https://ub-madoc.bib.uni-mannheim.de/353/1/dp0302.pdf>, zuletzt aktualisiert am 17.08.2018.
- Bonten, C. (2016): Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen. München: Carl Hanser Verlag.
- bpb (2018): Energiewende. Hg. v. Bundeszentrale für politische Bildung (bpb). Online verfügbar unter <http://www.bpb.de/nachschlagen/lexika/lexikon-der-wirtschaft/159947/energiewende>, zuletzt aktualisiert am 14.08.2018.
- Bruder, U. (2016): Kunststofftechnik leicht gemacht. Werkstoffe - Verarbeitung - Werkzeuggestaltung - Kostenkalkulation - Nachbearbeitung - Fügeverfahren - Materialauswahl - Konstruktionsregeln - Prozessoptimierung - Fehlerbehebung. [S.l.]: Carl Hanser Verlag.
- Brunke, J.-C. (2017): Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland: Eine Analyse mit Hilfe von Energieeinsparkostenkurven. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Brunke, J.-C.; Blesl, M. (2014a): A plant-specific bottom-up approach for assessing the cost-effective energy conservation potential and its ability to compensate rising energy-related costs in the German iron and steel industry. In: *Energy Policy* 67, S. 431–446. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.12.024.
- Brunke, J.-C.; Blesl, M. (2014b): Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs. In: *Journal of Cleaner Production* 82, S. 94–111. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.06.074.
- Brunke, J.-C.; Blesl, M. (2015): Energy efficiency in the German cement industry against the background of more stringent energy policy targets and rising energy costs – Part 1. In: *ZKG International*, S. 56–71.
- Brunke, J.-C.; Johansson, M.; Thollander, P. (2014): Empirical investigation of barriers and drivers to the adoption of energy conservation measures, energy management practices and energy services in the Swedish iron and steel industry. In: *Journal of Cleaner Production* 84, S. 509–525. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.04.078.
- Bubeck, S. (2017): Potenziale elektrischer Energieanwendungstechniken zur rationellen Energieanwendung. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.

- Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (2010): Gesetz über Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen vom 4. November 2010. (BGBl. I S. 1483).
- Burgess, E. (1837): General Remarks on the Temperature of the Terrestrial Globe and the Planetary Spaces. by Baron Fourier. Translation from the French, of Fourier, J. B. J., 1824, "Remarques Générales Sur Les Températures Du Globe Terrestre Et Des Espaces Planétaires.", *Annales de Chimie et de Physique*, Vol. 27, pp. 136–167. In: *American Journal of Science* 32, S. 1–20.
- Calpeda (2015): Preisliste / price list 2015. Hg. v. Calpeda Pumpen Vertrieb GmbH. Alzenau.
- CIAT (2006): Freie Kühlung in Klima-Kältesystemen. Energieeinsparpotenzial liegt in der Luft. In: *IKZ-Fachplaner* (7).
- Clark, G. L.; Wrigley, N. (1995): Sunk Costs: A Framework for Economic Geography. In: *Transactions of the Institute of British Geographers* 20 (2), S. 204–223. DOI: 10.2307/622432.
- CMI (2018): The Millenium Proze Problems. Hg. v. Clay Mathematics Institute. Online verfügbar unter <http://www.claymath.org/millennium-problems/millennium-prize-problems>, zuletzt aktualisiert am 04.08.2018.
- comefri (2015): Preisliste K2/1. Stand Oktober 2015. Hg. v. Comefri GmbH. Essenbach-Altheim.
- Consultic (2016): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015. -Kurzfassung-. Hg. v. Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH im Auftrag von BKV GmbH, PlasticsEurope Deutschland e. V., IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e. V., VDMA Fachverband Kunststoff und Gummimaschinen sowie Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. (BVSE). Alzenau.
- CSI (2009): Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead (CSI/ECRA-Technology Papers). Hg. v. Cement Sustainability Initiative (CSI), a member-led program of the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Düsseldorf, Genf. Online verfügbar unter <http://www.wbcdcement.org/pdf/technology/Technology%20papers.pdf>, zuletzt aktualisiert am 05.07.2017.
- da Costa Bortoni, E. (2009): Are my motors oversized? In: *Energy Conversion and Management* 50 (9), S. 2282–2287. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.05.004.
- Dementjeva, N.; Siirde, A. (2009): Analysis of energy models and their adaptability for Estonian energy market. In: *ENERGETIKA* (T. 55. Nr. 2), S. 107–115.

- Dempe, S.; Schreier, H. (2006): Operations Research. Deterministische Modelle und Methoden. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- dena (2010a): Elektrische Motoren in Industrie und Gewerbe. Energieeffizienz und Ökodesign-Richtlinie. Unter Mitarbeit von Günther Volz. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur (dena). Berlin.
- dena (2010b): Kältetechnik für Industrie und Gewerbe. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur (dena). Berlin.
- dena (2010c): Lufttechnik für Industrie und Gewerbe. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur (dena). Berlin.
- dena (2010d): Pumpen und Pumpensysteme für Industrie und Gewerbe. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur (dena). Berlin.
- dena (2010e): Vordenker, Vorreiter, Vorbilder. Hervorragende Beispiele zur Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie und Gewerbe. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur (dena). Berlin.
- dena (2013): Elektrische Motoren in Industrie und Gewerbe: Energieeffizienz und Ökodesign-Richtlinie. Unter Mitarbeit von Günther Volz. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur (dena). Berlin.
- Deng, G. (2007): Simulation-Based Optimization. Dissertation. University of Wisconsin - Madison, Wisconsin. Mathematics and Computation in Engineering.
- DIN (1987): Maschinen zum Verarbeiten von Kunststoffen und Kautschuk (DIN 24 450). DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin.
- Dispan, J. (2013): IMU Informationsdienst 4/2013 Kunststoffverarbeitung in Deutschland - Branchenreport 2013. 1. Aufl., neue Ausg. München: IMU Institut (IMU-Informationsdienst, 4/2013).
- Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R.; Scholl, A. (2015): Einführung in Operations Research. 9., überarb. u. verb. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Dörn, Sebastian (2016): Programmieren für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Vieweg (EXamen.press).
- Dreborg, K. H. (1996): Essence of Backcasting. In: *Futre* 28 (9), S. 813–828.
- Dudenredaktion (o. J.): Stichwort: Technologie. Hg. v. Bibliographisches Institut GmbH. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/rechtschreibung/Technologie>, zuletzt aktualisiert am 05.07.2017.

- Duflou, J. R.; Sutherland, J. W.; Dornfeld, D.; Herrmann, C.; Jeswiet, J.; Kara, S., Hauschild, M.; Kellens, K. (2012): Towards energy and resource efficient manufacturing: a processes and systems approach. In: *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* (61), S. 587–609. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.002.
- DWDS (2017a): Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache. Stichwort: Querschnitt. Hg. v. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Online verfügbar unter <https://www.dwds.de/wb/Querschnitt>, zuletzt aktualisiert am 05.07.2017.
- DWDS (2017b): Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache. Stichwort: Technologie. Hg. v. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Online verfügbar unter <https://www.dwds.de/wb/Technologie>, zuletzt aktualisiert am 05.07.2017.
- Dyckhoff, H.; Spengler, T. S. (2010): Produktionswirtschaft. Eine Einführung. 3., überarb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer (Springer-Lehrbuch).
- EnergieAgentur Ravensburg (o. J.): Strom sparen im Haushalt. LED - Licht im Wandel. Grundlagen, Austausch im Bestand und Einsatz im Neubau. Hg. v. EnergieAgentur Ravensburg gGmbH. Ravensburg.
- DIN 16212, 2012: Energieeffizienz- und einsparberechnung - Top-Down und Bottom-Up-Methoden; Deutsche Fassung EN 16212:2012.
- Engel, J. F.; Blackwell, R. D.; Kegerreis, R. J. (1969): Word-of-Mouth Communication by the Innovator. In: *Journal of Marketing* 33 (3), S. 15. DOI: 10.2307/1248475.
- Environlight (2015): Environlight GmbH Preisliste AA - zzgl. MwSt. Hg. v. Environlight GmbH. München.
- Eriksson, K.; Estep, D. J.; Johnson, C. (2013): Angewandte Mathematik. Body and soul. Berlin: Springer.
- ES (2015): Preisliste Januar 2015. Hg. v. Erich Schäfer GmbH & Co. KG.
- Europäische Kommission (2003): Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 1993 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. EU Empfehlung 2003/361/EG.
- Europäische Kommission (2006): The European Pilot Motor Challenge Programme. Aktive Systeme zur Kälteerzeugung. Brüssel.
- Europäische Kommission (2011): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Energieeffizienzplan 2011. Hg. v. Europäische Kommission. Brüssel.

- Europäisches Parlament und Rat (2006): 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.
- Europäisches Parlament und Rat (2008): Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. 2008/98/EC.
- Europäisches Parlament und Rat (2009a): Verordnung (EG) Nr. 641/2009 der Kommission vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von externen Nassläufer-Umwälzpumpen und in Produkte integrierten Nassläufer-Umwälzpumpen. EG 641/2009.
- Europäisches Parlament und Rat (2009b): Verordnung (EG) Nr. 640/2009 der Kommission vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren. EG 640/2009.
- Europäisches Parlament und Rat (2011): Verordnung (EU) Nr. 327/2011 der Kommission von 30. März 2011 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Ventilatoren, die durch Motoren mit einer elektrischen Eingangsleistung zwischen 125 W und 500 kW angetrieben werden. Verordnung (EG) 327/2011.
- Europäisches Parlament und Rat (2012): Delegierte Verordnung (EU) Nr. 874/2012 der Kommission vom 12. Juli 2012 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energieverbrauchskennzeichnung von elektrischen Lampen und Leuchten. Verordnung (EU) 874/2012.
- European Central Bank (2017): Euro foreign exchange reference rates. Online verfügbar unter https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/index.en.html, zuletzt geprüft am 14.09.2017.
- Falkner, H.; Dollard, G. (2008a): EuP Lot 11: Circulators in buildings. Hg. v. AEA Energy & Environment im Auftrag der Europäischen Kommission. Didcot.
- Falkner, H.; Dollard, G. (2008b): EuP Lot 11: Pumps (in commercial buildings, drinking water pumping, food industry, agriculture). Hg. v. AEA Energy & Environment im Auftrag der Europäischen Kommission. Didcot.

- Flatau, R.; Radgen, P. (2017): Integrated Assessment of Energy Efficiency Measures in an Industrial Energy Supply System. A Case Study for the German Plastic Processing Industry. 15th IAEE European Conference. Wien, 04.09.2017.
- Fleischer, B. (2019): Systemeffekte von Bioenergie in der Elektrizitäts- und Fernwärmewirtschaft. Eine modellgestützte Analyse langfristiger Energiewendeszenarien in Deutschland. unv. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Fleiter, T.; Fehrenbach, D.; Worrell, E.; Eichhammer, W. (2012): Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. In: *Energy* 40 (1), S. 84–99. DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.025.
- Fleiter, T.; Hagemann, M.; Hirzel, S.; Eichhammer, W.; Wietschel, M. (2009): Costs and potentials of energy savings in European industry - a critical assessment of the concept of conservation supply curves. In: *ECEEE 2009 Summer Study*, S. 1261–1272.
- Fleiter, T.; Schломann, B.; Eichhammer, W. (2013): Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.
- Fleiter, T.; Worrell, E.; Eichhammer, W. (2011): Barriers to energy efficiency in industrial bottom-up energy demand models—A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (6), S. 3099–3111. DOI: 10.1016/j.rser.2011.03.025.
- Fourier, J.-B. J. (1827): Mémoire sur la température du globe terrestre et des espaces planétaires. In: *Memoirs of the Royal Academy of Sciences of the Institut de France*, S. 569–604.
- GEA (2012): Glass Alliance Europe reiterates concerns on Eco-Design of Furnaces Draft Final Report – calls for glass to be excluded. Hg. v. Glass Alliance Europe. Online verfügbar unter http://www.glassallianceeurope.eu/images/cont/glass-alliance-europe-comments-to-the-draft-final-report-on-ecodesign-for-furnaces-vdef_file.pdf, zuletzt aktualisiert am 05.07.2017.
- Gebhardt, N.; Herschel, D.; Nollau, R.; Will, D. (2008): Hydraulik. Grundlagen, Komponenten, Schaltungen. 4., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer.
- Gefran (2013): Frequenzumrichter: Serie ADV 200 / 400V. Hg. v. GEFTRAN Deutschland GmbH. Seligenstadt.
- Gillingham, K.; Palmer, K. (2014): Bridging the Energy Efficiency Gap. Policy Insights from Economic Theory and Empirical Evidence. In: *Review of Environmental Economics and Policy* 8 (1), S. 18–38. DOI: 10.1093/reep/ret021.

- Götz, B.; Voß, A.; Blesl, M.; Fahl, U. (2011): Die Auswirkungen des EEG auf das Energiesystem Deutschlands – Eine Betrachtung mit dem Energiesystemmodell TIMES-D. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* (35 (3)), S. 183–194.
- Götze, U. (2015): Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
- Graf (2018a): Behälter. Hg. v. Otto GRAF GmbH Kunststoffherzeugnisse. Online verfügbar unter <https://www.graf-online.de/lagerung-transport/behaelter.html>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2018.
- Graf (2018b): Tanks/Container. Hg. v. Otto GRAF GmbH Kunststoffherzeugnisse. Online verfügbar unter <https://www.graf-online.de/lagerung-transport/tankscontainer.html>, zuletzt geprüft am 29.08.2018.
- Grawe, J.; Schulz, E.; Winklar, R. (1991): Energiesparen mit Strom. 4. Auflage. Bonn Aktuell, Stuttgart, München, Landsberg.
- Greif, H.; Limper, A.; Fattmann, G. (2017): Technologie der Extrusion. Lern- und Arbeitsbuch für die Aus- und Weiterbildung. 2. Aufl. [S.l.]: Carl Hanser Verlag.
- Grubb, M.; Edmonds, J.; ten Brink, P.; Morrison, M. (1993): The Costs of Limiting Fossil-Fuel CO₂ Emissions: A Survey and Analysis. In: *Annu. Rev. Energy. Environ.* 18, S. 397–478. DOI: 10.1146/annurev.eg.18.110193.002145.
- Gruhn, G.; Hartmann, K.; Kardos, J.; Helfricht, R.; Dietzsch, L.; Kauschus, W. (1976): Systemverfahrenstechnik I. Modellierung und Simulation verfahrenstechnischer Systeme. Berlin.
- Grundfos (2004): Pumpenhandbuch. Hg. v. GRUNDFOS Management A/S. Online verfügbar unter http://machining.grundfos.de/media/60727/grundfos_pumpenhandbuch.pdf, zuletzt geprüft am 10.12.2018.
- Grundfos (2016): Preisliste 2016. Hg. v. Grundfos GmbH.
- Grundmann, R.; Schönholtz, F. (1999): Ventilatoren-Fibel. Grundlagen der Ventilatorentechnik. Unter Mitarbeit von Herbert Eidam und Bernd Rahn. Hg. v. Promotor Verlag. Karlsruhe.
- Grünig, R.; Kühn, R. (2013): Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme. Ein heuristischer Ansatz. 4. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Gabler (SpringerLink: Bücher).
- GWE (2015): Preisliste 2015. Hg. v. GWE German Water and Energy Group. Peine.

- Hall, L. M.H.; Buckley, A. R. (2016): A review of energy systems models in the UK. Prevalent usage and categorisation. In: *Applied Energy* 169, S. 607–628. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.044.
- Hanssmann, F. (1978): Einführung in die Systemforschung. Methodik der modellgestützten Entscheidungsvorbereitung. München: R. Oldenbourg (Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Hasanbeigi, A.; Menke, C.; Therdyothin, A. (2010a): The use of conservation supply curves in energy policy and economic analysis: The case study of Thai cement industry. In: *Energy Policy* 38 (1), S. 392–405. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.09.030.
- Hasanbeigi, A.; Morrow, W.; Masanet, E.; Sathaye, J.; Xu, T. (2013): Energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction opportunities in the cement industry in China. In: *Energy Policy* 57, S. 287–297. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.01.053.
- Hasanbeigi, A.; Price, L.; Lu, H.; Lan, W. (2010b): Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants. In: *Energy* 35 (8), S. 3461–3473. DOI: 10.1016/j.energy.2010.04.046.
- Haywood, K. M. (1989): Managing Word of Mouth Communications. In: *Journal of Services Marketing* 3 (2), S. 55–67. DOI: 10.1108/EUM0000000002486.
- HeGo PolyForm (2018): Richtwerte für die Vortrocknung von Rohstoffen. Hg. v. HeGo PolyForm. Online verfügbar unter https://www.hego-polyform.de/PDF/Richtwerte_Trocknung.pdf, zuletzt aktualisiert am 07.08.2018.
- Helios (2016): Preisliste 2016. TGA Katalog 2.1. Hg. v. Helios Ventilatoren GmbH + Co KG. Villingen-Schwenningen.
- Herrmann, C.; Thiede, S. (2009): Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 1 (4), S. 221–229. DOI: 10.1016/j.cirpj.2009.06.005.
- Herrmann, C.; Thiede, S.; Kara, S.; Hesselbach, J. (2011): Energy oriented simulation of manufacturing systems – Concept and application. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (1), S. 45–48. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.127.
- Hesselbach, J. (2012): Energie- und klimaeffiziente Produktion. Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. 2012. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Hirst, E.; Brown, M. (1990): Closing the efficiency gap: barriers to the efficient use of energy. In: *Resources Conservation and Recycling* 3 (4), S. 267–281. DOI: 10.1016/0921-3449(90)90023-W.

- Hirzel, S. (2015): Analyse und Bewertung industrieller Energieeffizienzmaßnahmen. Ein multikriterieller Ansatz für Gruppenentscheidungen unter Unsicherheit dargestellt am Beispiel von Druckluftsystemen. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 15, Umwelttechnik, 257).
- Hirzel, S. (2017): Technologiebericht 6.2 Energieeffiziente Querschnittstechnologien. Hg. v. Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
- Hopmann, C.; Michaeli, W. (2015): Einführung in die Kunststoffverarbeitung. 7., aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag.
- Hopmann, C.; Michaeli, W.; Greif, H.; Ehrig, F. (2017): Technologie des Spritzgießens. Lern- und Arbeitsbuch. 4. Aufl. [S.l.]: Carl Hanser Verlag.
- Horak, J. (2015): Lineare Interpolation in zwei Dimensionen. Online verfügbar unter www.timaios.org, zuletzt geprüft am 20.01.2019.
- Hourcade, J.-C.; Jaccard, M.; Bataille, C.; Gherzi, F. (2006): Hybrid Modeling: New Answers to Old Challenges. Introduction to the Special Issue of "The Energy Journal". In: *The Energy Journal* 27 (Special Issue), S. 1–11. DOI: 10.2307/23297043.
- Hourcade, J.-C.; Richels, R.; Robinson J.R.; Schrattenholzer, L. (1996): Estimating the costs of mitigating greenhouse gases. In: Robert Tony Watson (Hg.): Climate change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses ; contribution of Working Group II to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- IAEA (2006): Model for Analysis of Energy Demand (MAED-2). Hg. v. International Atomic Energy Agency (IAEA). Wien (Computer Manual Series No. 18).
- IEA (2017): World Energy Outlook 2017. Hg. v. International Energy Agency (IEA). Paris, France.
- IER (o. J.): Interne Energieaudits der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland (Bezugsjahr der Energieaudits: 2007). Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) an der Universität Stuttgart. unveröffentlicht.
- Illig (2016): Thermoformen in der Praxis. Unter Mitarbeit von Schwarzmann und Peter. 3. Aufl. [S.l.]: Carl Hanser Verlag.
- Imboden, D. M.; Koch, S. (2003): Systemanalyse. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung et al. Cambridge University Press, Cambridge, Großbritannien und New York.
- IPCC (2014): Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Unter Mitarbeit von R. K. Pachauri und L. A. Meyer. Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.
- IREES (2011): Untersuchung des Energieeinsparpotentials für ein Nachfolgemodell ab dem Jahr 2013ff zu Steuerbegünstigungen für Unternehmen des Produzierenden Gewerbes sowie der Land- und Forstwirtschaft bei der Energie- und Stromsteuer. Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien. Karlsruhe.
- Jaberg, H. (o. J.): Drehzahlregelung von Kreisel- und Verdrängerpumpen. Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen an der Technischen Universität Graz. Graz, o. J.
- Jaffe, A. B.; Stavins, R. N. (1994): The energy-efficiency gap. What does it mean? In: *Energy Policy* 22 (10), S. 804–810. DOI: 10.1016/0301-4215(94)90138-4.
- Jagnow, K.; Sell, I.; Wolff, D. (2014): Kostenfunktionen für Komponenten der Heizung, Lüftung und Trinkwarmwasserbereitung in Wohnbauten. Ingenieurbüro für TGA und Energieberatung; anTec Energiesysteme KG; Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel. [o. A.].
- Jebaraj, S.; Iniyar, S. (2006): A review of energy models. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10 (4), S. 281–311. DOI: 10.1016/j.rser.2004.09.004.
- Johannaber, F. (2004): Kunststoff-Maschinenführer. 4. Ausg. München: Hanser.
- Johannaber, F. (2008): Injection molding machines. A user's guide. 4th ed. München, Cincinnati: Carl Hanser Publishers; Hanser Gardner Publications.
- Jung, M. (2016): Erstellung von Kostenfunktionen für Querschnittstechnologien auf Basis einer quantitativen Erhebung. Masterarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Kanister-Vertrieb (2018): Kunststofffässer. Hg. v. Kanister-Vertrieb MW. Online verfügbar unter <https://www.kanister-vertrieb.de/kunststofffaesser/>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2018.
- Kannan, R.; Turton, H. (2012): Cost of ad-hoc nuclear policy uncertainties in the evolution of the Swiss electricity system. In: *Energy Policy* (50), S. 391–406.

- Karp, R. M. (1972): Reducibility among combinatorial problems. In: *Miller R.E., Thatcher J.W., Bohlinger J.D. (eds) Complexity of Computer Computations. The IBM Research Symposia Series. Springer, Boston, MA.*, S. 85–103. DOI: 10.1007/978-1-4684-2001-2_9.
- Kaya, D.; Yagmur, E. A.; Yigit, K. S.; Kilic, F. C.; Eren, A. S.; Celik, C. (2008): Energy efficiency in pumps. In: *Energy Conversion and Management* 49 (6), S. 1662–1673. DOI: 10.1016/j.enconman.2007.11.010.
- Kemmerich Elektromotoren (2015): Drehstrom & Wechselstrom (Normmotoren) Käfigläufermotoren entsprechend DIN EN 60034. Technische Preisliste. Hg. v. Kemmerich Elektromotoren GmbH & Co. KG. Gummersbach - Windhagen.
- Kerdoncuff, P. (2008): Modellierung und Bewertung von Prozessketten zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation. Dissertation. Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Kesicki, F. (2010): Marginal abatement cost curves for policy making - expert-based vs. model-derived curves. In: *33rd IAEE International Conference*.
- Kesicki, F. (2013a): Marginal Abatement Cost Curves. Combining Energy System Modelling and Decomposition Analysis. In: *Environ Model Assess* 18 (1), S. 27–37. DOI: 10.1007/s10666-012-9330-6.
- Kesicki, F. (2013b): What are the key drivers of MAC curves? A partial-equilibrium modelling approach for the UK. In: *Energy Policy* 58, S. 142–151. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.02.043.
- Kesicki, F.; Ekins, P. (2012): Marginal abatement cost curves. A call for caution. In: *Climate Policy* 12 (2), S. 219–236. DOI: 10.1080/14693062.2011.582347.
- Kesicki, F.; Strachan, N. (2011): Marginal abatement cost (MAC) curves: confronting theory and practice. In: *Environmental Science & Policy* 14 (8), S. 1195–1204. DOI: 10.1016/j.envsci.2011.08.004.
- Kober, T. (2014): Energiewirtschaftliche Anforderungen an neue fossil befeuerte Kraftwerke mit CO₂-Abscheidung im liberalisierten europäischen Elektrizitätsmarkt. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Konikow, L. F.; Bredehoeft, J. D. (1992): Ground-water models cannot be validated. In: *Advances in Water Resources* 15 (1), S. 75–83. DOI: 10.1016/0309-1708(92)90033-X.
- Konstantin, P. (2017): Praxisbuch Energiewirtschaft. Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. 4., aktualisierte Aufl. 2017. Berlin: Springer Berlin; Springer Vieweg (VDI-Buch).

- Koomey, J.; Atkionson, C.; Meier, A. K.; McMahon, J.; Boghosian, S.; Atkionson, B. et al. (1991): The potential for electricity efficiency improvements in the U.S. residential sector. Hg. v. Energy Analysis Program, Lawrence Berkeley Laboratory im Auftrag des U.S. Department of Energy. Berkeley, California (US).
- Kosmol, J.; Kanthak, J.; Golde, M.; Alsleben, C.; Penn-Bressel, G.; Schmitz, S.; Gromke, U. (2012): Glossar zum Ressourcenschutz. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau.
- Krajnc, D. (2012): Energy Audit Summary Report. Audit No. 57. Berlin, Barcelona.
- KSB (2015): Pumpen- und Automatisierungstechnik 2015. Hg. v. KSB SE & Co. KGaA. Frankenthal.
- Kubiak, R.; Kemna, R.; Lemeire, C.; Wierda; van den Boorn, R.; Wierda, L. et al. (2015): Preparatory Study on Light Sources for Ecodesign and/or Energy Labelling Requirements ('Lot 8/9/19'). Final report, Task 0. Hg. v. VHK, VITO und JeffCott Associates im Auftrag der Europäischen Kommission. Brüssel.
- Kuder, R. (2014): Energieeffizienz in der Industrie. Modellgestützte Analyse des effizienten Energieeinsatzes in der EU-27 mit Fokus auf den Industriesektor. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Küenle Antriebssysteme (2016): Produktübersicht 2016. Hg. v. Küenle Antriebssysteme GmbH & Co. KG. Hemmingen.
- Kuik, O.; Brander, L.; Tol, R. S.J. (2009): Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions. A meta-analysis. In: *Energy Policy* 37 (4), S. 1395–1403. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.11.040.
- Kulterer, K.; Mair, O. (2013): Leitfaden für Energieaudits in Kältesystemen. Version 23.9.2013. Unter Mitarbeit von T. Sulzer, A. Betrand, M. Blaser und J. Saar. Hg. v. Österreichische Energieagentur - Austrian Energy Agency. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft [Lebensmittelministerium]. [o. A.].
- Kypreos, S.; Lehtila, A. (2015): Decomposing TIAM-MACRO to Assess Climatic Change Mitigation. In: *Environmental Modeling & Assessment* (20 (6)), S. 571–584.
- Labriet, M.; Loulou, R.; Kanudia, A. (2008): Is a 2 degrees Celsius warming achievable under high uncertainty? Analysis with the TIMES integrated assessment model. In: *Les Cahiers du GERAD* (G-2008-30), S. 1–23.

- Laczniak, R. N.; DeCarlo, T. E.; Ramaswami, S. N. (2001): Consumers' Responses to Negative Word-of-Mouth Communication: An Attribution Theory Perspective. In: *Journal of Consumer Psychology* 11 (1), S. 57–73. DOI: 10.1207/S15327663JCP1101_5.
- Law, A. M.; McComas, M. G. (2000): Simulation-Based Optimization. In: *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, S. 46–49. DOI: 10.1109/WSC.2002.1172866.
- Leontief, W. W. (1986): Input-output economics. 2. ed. New York, N.Y., Oxford: Oxford University Press.
- Levihn, F.; Nuur, C.; Laestadius, S. (2014): Marginal abatement cost curves and abatement strategies: Taking option interdependency and investments unrelated to climate change into account. In: *Energy* 76, S. 336–344. DOI: 10.1016/j.energy.2014.08.025.
- LfU (2012): Abwärmenutzung im Betrieb. Klima schützen - Kosten senken. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.
- Li, Y.; Zhu, L. (2014): Cost of energy saving and CO₂ emissions reduction in China's iron and steel sector. In: *Applied Energy* 130, S. 603–616. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.04.014.
- Liang, M.; Huff, H. E.; Hsieh, F. H. (2002): Evaluating Energy Consumption and Efficiency of a Twin-Screw Extruder. In: *Food Engineering and Physical Properties* (67), S. 1803–1807. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb08726.x.
- Linstone, H. A. (1979): The delphi method. Techniques and applications. 3. print. Reading, Mass.: Addison-Wesley.
- Loulou, R.; Goldstein, G.; Kanudia, A.; Lettila, A.; Remme, U. (2016): Documentation for the TIMES Model. Part I. Hg. v. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I_July-2016.pdf, zuletzt geprüft am 19.03.2018.
- Madan, J.; Mani, M.; Lee, J. H.; Lyons, K. W. (2015): Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes. Injection molding case study. In: *Journal of Cleaner Production* 105, S. 157–170. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.060.
- Madan, J.; Mani, M.; Lyons, K. W. (2013): Characterizing Energy Consumption of the Injection Molding Process. In: *ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference*.
- MAICO (2015): Alphabetische Preisliste 2015/16. Hg. v. Maico Elektroapparate-Fabrik GmbH. Villingen-Schwenningen.
- Manne, A.; Mendelsohn, R.; Richels, R. (1995): A model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies. In: *Energy Policy* (23 (1)), S. 17–34.

- Manstetten, R.; Hottinger, O.; Faber, M. (1998): Zur Aktualität von Adam Smith: Homo oeconomicus und ganzheitliches Menschenbild. Hg. v. Accedo Verlagsgesellschaft. München.
- Mark (2015): Kolbenkompressoren für Industrie, Handwerk und Gewerbe. Lagerliste 2015. Hg. v. Druckluft-Service Karl Kummerfeldt Nachf. Andreas Zapalla e. Kfm. Emmerich am Rhein.
- Mattis, J.; Sheng, P.; DiScipio, W.; Leong, K. (1996): A Framework for Analyzing Energy Efficient Injection-Molding Die Design. In: *1996 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. ISEE-1996*, S. 207–212. DOI: 10.1109/ISEE.1996.501879.
- McKane, A.; Hasanbeigi, A. (2011): Motor systems energy efficiency supply curves: A methodology for assessing the energy efficiency potential of industrial motor systems. In: *Energy Policy* 39 (10), S. 6595–6607. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.08.004.
- McKinsey&Company (2009): Pathways to a Low-Carbon Economy. Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve. Hg. v. McKinsey & Company Inc. [o. A.].
- Meibom, P.; Larsen, H.; Barth, R.; Brand, H.; Weber, C.; Voll, O. (2006): Wilmar Joint Market Model. Documentation. Risoe National Laboratory, University of Stuttgart, University of Duisburg-Essen.
- Meier, A.; Wright, J.; Rosenfeld, A. H. (1983): Supplying energy through greater efficiency. The potential for conservation in california's residential sector. In: *Journal of Policy Analysis and Management* 3 (4), S. 643. DOI: 10.1002/pam.4050030465.
- Meier, A. K. (1982): Supply Curves of Conserved Energy. Ph.D. thesis. University of California, Berkeley, Berkeley.
- Menny, K. (2006): Strömungsmaschinen. Hydraulische und thermische Kraft- und Arbeitsmaschinen. 5., überarb. Aufl. Wiesbaden: Teubner.
- Messner, S.; Strubegger, M. (1995): Model-Based Decision Support in Energy Planning. II-ASA Working Paper, WP-95-119. International Institute für Applied Systems Analysis, Laxenburg.
- Mietzner, D. (2009): Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen. Methodenevaluation und neue Ansätze. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler (Gabler research: Innovation und Technologie im modernen Management).

- Miller, M. (2019): Wege zur Ermittlung von Energieeffizienzpotenzialen von Informations- und Kommunikationstechnologien. Dissertation in Vorbereitung. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Miller, M.; Bubeck, S.; Hufendiek, K. (2016): Zur Methodik von Effizienzbewertungen im energiewirtschaftlichen Kontext. In: *Z Energiewirtsch.* DOI: 10.1007/s12398-016-0180-9.
- Morrow, W. R.; Hasanbeigi, A.; Sathaye, J.; Xu, T. (2014): Assessment of energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction potentials in India's cement and iron & steel industries. In: *Journal of Cleaner Production* 65, S. 131–141. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.07.022.
- Motor Challenge (2013): Optimizing Your Motor-Driven System. Hg. v. U.S. Department of Energy. [o. A.]. Online verfügbar unter www.motor.doe.gov.
- Mousavi, B. (2019): Analysis of the relative roles of supply-side and demand-side measures in tackling global climate change – Application of a hybrid energy system model. Unveröffentlichte Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Mousavi, S.; Kara, S.; Kornfeld, B. (2016): A hierarchical framework for concurrent assessment of energy and water efficiency in manufacturing systems. In: *Journal of Cleaner Production* 133, S. 88–98. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.074.
- Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J. (2009): Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. 1. Aufl. Berlin: Springer Berlin.
- Nakata, T.; Silva, D.; Rodionov, M. (2011): Application of energy system models for designing a low-carbon society. In: *Progress in Energy and Combustion Science* (37 (4)), S. 462–502.
- Neshat, N.; Amin-Naseri, M. R.; Danesh, F. (2014): Energy models: Methods and characteristics. In: *Journal of Energy in Southern Africa* 25 (4), S. 101–111.
- NiBiS (2018): Blasfolienextrusion. Hg. v. Niedersächsisches Landesinstitut für schulische Qualitätsentwicklung. Online verfügbar unter <http://www.technikatlas.de/~tb4/extrusion.htm>, zuletzt aktualisiert am 15.11.2018.
- OECD; IEA (2016): World Energy Model Documentation. Hg. v. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2016/WEM_Documentation_WEO2016.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2017.
- Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2014): Klimaschutzszenario 2050. 1. Modellierungsrunde. Hg. v. Öko-Institut e. V. und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)

im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin.

Okoli, C.; Pawlowski, S. D. (2004): The Delphi method as a research tool. An example, design considerations and applications. In: *Information & Management* 42 (1), S. 15–29. DOI: 10.1016/j.im.2003.11.002.

Ökotec (2007): Energieeffizienz in der mittelständischen Industrie. Hg. v. ÖKOTEC Energiemanagement GmbH. Gesamtverband der kunststoffverarbeitenden Industrie (GKV); Verband der Hersteller von Tensiden, Textil-, Papier- und Lederchemikalien, kosmetischen Rohstoffen und verwandten Hilfsmitteln und Additiven für die industrielle Weiterverarbeitung (TEGEWA). Berlin.

Oreskes, N. (2004): Beyond the ivory tower. The scientific consensus on climate change. In: *Science (New York, N.Y.)* 306 (5702), S. 1686. DOI: 10.1126/science.1103618.

Oreskes, N.; Shrader-Frechette, K.; Belitz, K. (1994): Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. In: *Science* 263 (5147), S. 641–646. DOI: 10.1126/science.263.5147.641.

Osram (2015a): Unverbindliche Preisempfehlung für Lampen und EVG. Juli 2015. Hg. v. Osram Licht AG. München.

Osram (2015b): Unverbindliche Preisempfehlung für Systeme. Juli 2015. Hg. v. Osram Licht AG. München.

Osswald, T. A.; Hernández-Ortiz, J. P. (2006): Polymer processing. Modeling and simulation. Munich: Hanser.

Özdemir, E. D. (2012): The Future Role of Alternative Powertrains and Fuels in the German Transport Sector. A model based scenario analysis with respect to technical, economic and environmental aspects with a focus on road transport. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.

Parker (2015): Preisliste & Produktübersicht 01/2016. Druckluft- und Gasaufbereitung, Prozesskühlung. Hg. v. Parker Hannifin GmbH. Bielefeld.

Pehnt, M. (2010): Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Pehnt, M.; Arens, M.; Duscha, M.; Eichhammer, W.; Fleiter, T. (2011): Energieeffizienz: Potenziale, volkswirtschaftliche Effekte und innovative Handlungs- und Förderfelder für die Nationale Klimaschutzinitiative. Hg. v. ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Prognos AG und Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH (GWS) gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Heidelberg, Karlsruhe, Berlin, Osnabrück, Freiburg.
- Pehnt, M.; Lutz, C.; Seefeldt, F.; Schlomann, B.; Wunsch, M.; Lehr, U. et al. (2009): Klimaschutz, Energieeffizienz und Beschäftigung Potenziale und volkswirtschaftliche Effekte einer ambitionierten Energieeffizienzstrategie für Deutschland. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Prognos AG, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) und Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH (GWS) gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin.
- Philips (2015): Produktübersicht. Leuchten und Lichtsteuerung. Hg. v. Philips GmbH Market DACH und Philips Austria GmbH. Hamburg.
- Pichler (2015): Preisliste Ventilatoren. Hg. v. J. Pichler Gesellschaft m.b.H. Klagenfurt am Wörthersee.
- Popper, K. (1935): Logik der Forschung. Zur Erkenntnistheorie der Modernen Naturwissenschaft. Vienna: Springer Vienna (Schriften zur Wissenschaftlichen Weltauffassung).
- Prognos AG (2006): Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklungen. Endbericht 18/06. Hg. v. Prognos AG im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Basel, Berlin.
- Puttinger, B. (1997): Energiekennzahlen und Sparpotenziale in der Kunststoffverarbeitung. Hg. v. Wirtschaftskammer OÖ, Ökologische Betriebsberatung & O.Ö. Energiesparverband. Wien.
- Radgen, P. (Hg.) (2002): Market Study for Improving Energy Efficiency for Fans. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, ETSU, Cory, University of Cagliari, Swedish National Energy Administration und AF-VVS Projekt AB gefördert durch die Europäische Kommission. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Radgen, P.; Blaustein, E. (2001): Compressed air systems in the European Union. Energy, emissions, savings potential and policy actions. Hg. v. ADEME, Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung (ISI), University of L'Aquila und ECE International VOF gefördert durch die Europäische Kommission. Stuttgart.

- Radgen, P.; Oberschmidt, J. (2008): EuP Lot 11: Fans for ventilation in non residential buildings. Final Report. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und W. T. W. Cory gefördert durch die Europäische Kommission. Karlsruhe.
- Rat der Europäischen Union (2012): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Energieeffizienz und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG – Ergebnisse der ersten Lesung des Europäischen Parlaments (Straßburg, 10. bis 13. September 2012). Hg. v. Rat der Europäischen Union. Brüssel.
- RECIPE (2005): Reduced Energy Consumption in Plastics Engineering. 2005 European Benchmarking Survey of energy consumption and adoption of best practice. Hg. v. Rapra Technology Ltd, British Plastics Federation, Danish Technology Institute, ASCAMM+, AMIPLAS, Pole Européen de Plasturgie, CRIF - Wallonie und Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) gefördert durch die Europäische Kommission. [o. A].
- Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek, E.-R. (2007): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 73. Aufl. München: DIV, Dt. Industrieverl.
- Remme, U. (2006): Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- RENNER (2016): Schraubenkompressoren. Hg. v. RENNER GmbH Kompressoren. Güglingen.
- Robinson, J. B. (1982): Energy backcasting. A proposed method of policy analysis. In: *Energy Policy* 10 (4), S. 337–344. DOI: 10.1016/0301-4215(82)90048-9.
- Röhrenbacher, H. (2008): Finanzierung und Investition (mit Excel und HP). Finanzplanung mit Cash flow-Statements, alle Investitionsrechnungsverfahren, ausführlich kommentierte Beispiele für Excel 2007 und HP 17 B/HP 19 B zum Soforteinsatz. 3., überarb. Aufl. Wien: Linde-Verl. (Fachbuch Wirtschaft).
- Rosenfeld, A.; Atkinson, C.; Koomey, J.; Meier, A.; Mowris, R. J.; Price, L. (1993): Conserved Energy Supply Curves for U.S. Buildings. In: *Contemporary Economic Policy* 11 (1), S. 45–68.

- Rosenkranz, J.; Mailach, B.; Gritzki, R.; Kaiser, J.; Perschk, A.; Rösler, M. et al. (2011): Gesamtanalyse Energieeffizienz von Hallengebäuden. Hg. v. Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden und Universität Kassel im Auftrag der Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und Wasserfach e. V. (FIGAWA) gefördert durch Mittel der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Dresden.
- IEC 60034-30-1: Rotating electrical machines.
- Ruck (2015): Preisliste 2015. Hg. v. ruck Ventilatoren GmbH. Boxberg.
- Ruppelt, E. (2003): Druckluft-Handbuch. 4. Aufl. Essen: Vulkan-Verl.
- S&P (2015): Alphabetische Preisliste 2015. Hg. v. Soler&Palau Ventilation Group. Darmstadt.
- Saltelli, A.; Ratto, M.; Andres, T.; Campolongo, F.; Cariboni, J.; Gatelli, D. et al. (2008): Global Sensitivity Analysis. The Primer. Hoboken, N.J., Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Sand, B. (2013): Parallele Algorithmen zur Lösung des Capacitated-Vehicle-Routing-Problems. Evaluierung des Einsatzes von Grafikkarten. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern. Fachbereich Wirtschaftswissenschaften.
- Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C. (2014): Entwicklung der Energiemärkte - Energieferenzprognose. Projekt Nr. 57/12 Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Hg. v. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), Prognos AG und Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (GWS) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Basel, Köln, Osnabrück.
- Schmid, C.; Brakhage, A.; Radgen, P.; Layer, G.; Arndt, U.; Carter, J. et al. (2003): Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs branchenübergreifender Techniken in den Bereichen Industrie und Kleinverbrauch. Förderkennzeichen 201 41 136. Hg. v. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung und Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA). Karlsruhe/München.
- Schneider, Klaus (2015): Preisliste 2015. Effiziente Druckluft-Systeme & Services für Handwerk und Mittelstand. Hg. v. Schneider Druckluft GmbH. Reutlingen.

- Schüle, R.; Irrek, W.; Nanning, S.; Rudolph, F.; Thomas, S.; Schlomann, B.; Eichhammer, W. (2011): Entwicklung von Methoden zur Evaluierung von Energieeinsparung. Unter Mitarbeit von Thomas Breuer und Miriam Müller. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie und Fraunhofer–Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA). Dessau-Roßlau.
- Segler, G.; Hutt, W. (1979): Pneumatische Fördersysteme und Beitrag zur Berechnung der Flugförderung. In: *Grundlagen der Landtechnik* 1, S. 13–19.
- Seow, Y.; Rahimifard, S. (2011): A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (3), S. 258–264. DOI: 10.1016/j.cirpj.2011.03.007.
- Shogren, J. F. (2013): *Encyclopedia of energy, natural resource, and environmental economics*. Amsterdam: Elsevier Science.
- Siemens AG (2015a): SIMOTICS Niederspannungsmotoren. Preisliste D81.1 P. Hg. v. Siemens AG. München.
- Siemens AG (2015b): SINAMICS Umrichter für Einachsantriebe und SIMOTICS Motoren. Katalog D 31. Hg. v. Siemens AG. München.
- Smith, A. (Hg.) (1776): *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. London.
- Speck Pumpen (2011): Effizienz der Vakuumbereitstellung und Vakuumnutzung in der Extrusionstechnik. Unter Mitarbeit von Pierre Hähre. Hg. v. Speck Pumpen Vakuumtechnik GmbH. Roth. Online verfügbar unter http://www.huckauf.de/PDF/speck/1096_1051_Effizienz_der_Vakuumbereitstellung_in_Extrusionstechnik_DE.pdf, zuletzt geprüft am 25.03.2018.
- Speck Pumpen (2013): Energie sparen in der Kunststoffprofil-Extrusion. Hg. v. Speck Pumpen Vakuumtechnik GmbH. Roth.
- Statistisches Bundesamt (2017a): Beschäftigung und Umsatz der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Fachserie 4 Reihe 4.1.1 - 2015. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2017b): Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Fachserie 4 Reihe 4.3 - 2015. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2018a): Preise. Preise und Preisindizes für gewerbliche Produkte (Erzeugerpreise) - Fachserie 17 Reihe 2. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

- Statistisches Bundesamt (2008): Klassifikation der Wirtschaftszweige. Mit Erläuterung. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2017c): Erhebung über die Energieverwendung. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2017d): Inlandsproduktberechnung - Detaillierte Jahresergebnisse. Fachserie 18 Reihe 1.4. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2017e): Produktion des Verarbeitendes Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden: Produktion nach Güterarten - Deutschland 2015. Fachserie 4/ Reihe 3.1. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2018b): Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Produzierendes Gewerbe. Fachserie 4 Reihe 4.3. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- Stoft, S. E. (1995): The Economics of Conserved-Energy "Supply" Curves. Working Paper. University of California, Berkeley, Berkeley. Energy Institute.
- Sun, N. (2013): Modellgestützte Untersuchung des Elektrizitätsmarkts. Kraftwerkseinsatzplanung und -investitionen. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Sustain Consult (2013): Beteiligungsorientierte Verbesserung der Ressourceneffizienz in der Kunststoffindustrie. Unter Mitarbeit von Torsten Sundmacher, Iskra Kondova, Ralf Löckener und Christian Sprute. Sustain Consult; Stiftung Arbeit und Umwelt der Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IG BCE); PlasticsEurope Deutschland e. V.; Gesamtverband der Kunststoffverarbeitenden Industrie e. V. (GKV). Dortmund, Hannover.
- Thielen, M.; Hartwig, K.; Gust, P. (2006): Blasformen von Kunststoffhohlkörpern. München, Wien: Hanser.
- Trautmann, A.; Meyer, J.; Herpertz, S. (2002): Rationelle Energienutzung in der Kunststoffverarbeitenden Industrie. Leitfaden für die betriebliche Praxis. 1. Aufl. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.
- Trianni, A.; Cagno, E.; Donatis, A. de (2014): A framework to characterize energy efficiency measures. In: *Applied Energy* 118, S. 207–220. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.042.
- TROX (2016): Preisliste 2016. Hg. v. TROX TLT GmbH. Bad Hersfeld.

- U.S. Department of Energy (2001): Assessment of the Market for Compressed Air Efficiency Services. Unter Mitarbeit von B. Collins, T. Jones, E. McGlynn, A. McKane, M. Mottley und H. Powell. Hg. v. U.S. Department of Energy's (DOE) - Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). Washington.
- U.S. Department of Energy (2002): United States Industrial Electric Motor Systems Market Opportunities Assessment. Hg. v. U.S. Department of Energy's (DOE) - Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). Washington.
- Umweltbundesamt (2013): Und sie erwärmt sich doch. Was steckt hinter der Debatte um den Klimawandel? Unter Mitarbeit von Harry Lehmann, Klaus Müschen, Steffi Richter und Claudia Mäder. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/und_sie_erwaermt_sich_doch_131201.pdf, zuletzt geprüft am 30.06.2017.
- Umweltbundesamt (2016): Klimawandel-Skeptiker. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/klimawandel-skeptiker#textpart-1>, zuletzt geprüft am 10.07.2017.
- UNIDO (2010): Motor Systems Efficiency Supply Curves. Hg. v. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). Wien.
- United Nations (1992): United Nations Framework Convention on Climate Change. Online verfügbar unter <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>, zuletzt geprüft am 29.06.2017.
- United Nations (1998): Report of the Conference of the Parties on its Third Session, held at Kyoto From 1 to 11 December 1997. Hg. v. United Nations. Kyoto.
- United Nations (2015): Adoption of the Paris Agreement. Online verfügbar unter <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>, zuletzt geprüft am 29.06.2017.
- United Nations (2017a): Paris Agreement - Status of Ratification. Hg. v. United Nations. Online verfügbar unter http://unfccc.int/paris_agreement/items/9444.php, zuletzt geprüft am 20.01.2019.
- United Nations (2017b): Status of Ratification on the Convention. Hg. v. United Nations. Online verfügbar unter http://unfccc.int/essential_background/convention/status_of_ratification/items/2631.php, zuletzt geprüft am 20.01.2019.
- Urbanek, O.; Saal, W. (2011): Energy efficiency of plastics and rubber machines in Europe. Hg. v. EUROMAP und Urbanek Innovation Consulting. Ried im Innkreis, Österreich.
- van Beeck, N. M. J. P. (1999): Classification of Energy Models. In: *FEW Research Memorandum 777*.

- van Elburg, M.; von den Boorn, R. (2017): Preparatory study on Low pressure & Oil-free Compressor Packages. Final Report. Van Holsteijn en Kemna BV (VHK) im Auftrag der Europäischen Kommission. [o. A.].
- van Tichelen, P.; Chung Lam, W.; Waide, P.; Kemna, R.; Vanhooydonck, L.; Wierda, L. (2017): Preparatory study on lighting systems 'Lot 37'. Hg. v. VITO, Waide Strategic, VHK und Krieos im Auftrag der Europäischen Kommission. Brüssel. Online verfügbar unter <http://ecodesign-lightingsystems.eu/>.
- VDI (2012): Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen (VDI 6025). Hg. v. Verband Deutscher Ingenieure (VDI). Düsseldorf.
- VDI (2014): Energiekenngrößen. Grundlagen - Methodik (VDI 4661). Hg. v. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Düsseldorf.
- Velthuisen, J. W. (1995): Determinants of investment in energy conservation. Amsterdam: Stichting voor Economisch Onderzoek der Universiteit van Amsterdam (SEO rapport, nr. 357).
- VEM (2015): Antriebstechnik. Preisliste 2015. Hg. v. VEM motors GmbH. Wernigerode.
- Vlachopoulos, J.; Strutt, D. (2003): Polymer processing. In: *Materials Science and Technology* 19 (9), S. 1161–1169. DOI: 10.1179/026708303225004738.
- von Bertalanffy, L. (1972): Zu einer allgemeinen Systemlehre. In: Knut Bleicher (Hg.): *Organisation als System*. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 31–45.
- von Reibnitz, U. (1992): *Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung*. 2. Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Voß, A. (1982): Nutzen und Grenzen von Energiemodellen - einige grundsätzliche Überlegungen. In: *Angewandte Systemanalyse* 3 (3), S. 111–117. DOI: 10.18419/opus-8129.
- Voß, A. (2010): *Systemtechnische Planungsmethoden in Wirtschaft und Technik*. Vorlesungsskript Sommersemester 2010. Hg. v. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) an der Universität Stuttgart. Stuttgart.
- Waide, P.; Brunner, C. U. (2011): *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*. Working Paper. Hg. v. International Energy Agency (IEA). Paris.
- Weart, S. R. (2008): *The discovery of global warming. Revised and expanded edition*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press (New histories of science, technology, and medicine).
- Wegener, I. (2003): *Komplexitätstheorie. Grenzen der Effizienz von Algorithmen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).

- Weiß, P. (2016): Energieeffizienz und Abwärmenutzung in der Kunststoffverarbeitung. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Duisburg.
- Williams, H. P. (2013): Model building in mathematical programming. 5th ed. Chichester, U.K.: J. Wiley & Sons.
- Willows, R.; Reynard, N.; Meadowcroft, I.; Connell, R. (2003): Climate adaptation: Risk, uncertainty and decision-making. UKCIP Technical Report. Hg. v. Im Auftrag des Department for Environment Food and Rural Affairs (defra) und der Environment Agency. Oxford.
- Wohlfarth, K.; Eichhammer, W.; Schlomann, B.; Worrell, E. (2018): Tailoring cross-sectional energy-efficiency measures to target groups in industry. In: *Energy Efficiency* 26 (1), S. 27. DOI: 10.1007/s12053-018-9619-7.
- Wolf, S. (2018): Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme - Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.
- World Energy Conference (1986): Energy Terminology. A Multi-Lingual Glossary. 2nd Edition. Hg. v. Pergamon Press. London.
- Worrell, E.; Laitner, J. A.; Ruth, M.; Finman, H. (2003): Productivity benefits of industrial energy efficiency measures. In: *Energy* 28 (11), S. 1081–1098. DOI: 10.1016/S0360-5442(03)00091-4.
- Worrell, E.; Martin, N.; Price, L. (2000): Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry. In: *Energy* 25 (12), S. 1189–1214. DOI: 10.1016/S0360-5442(00)00042-6.
- Young, D.; Blanford, G. J.; Merrick, J. H. (2014): A Clean Energy Standard Analysis with the US-Regen Model. In: *The Energy Journal* (35 (1)), S. 135–164.
- Yu, C. J.; Sunderland, J. E. (1992): Determination of Ejection Temperatur and Cooling Time in Injection Molding. In: *Polymer Engineering and Science* 32 (3), S. 191–197. DOI: 10.1002/pen.760320305.
- Zeigler, B. P.; Praehofer, H.; Kim, T. G. (1976): Theory of Modeling and Simulation. Integrating Discrete Event and Continous Complex Dynamic Systems. Second Edition: Academic Press.
- Zeilinger, F.; Einfalt, A. (2012): Modell für hochauflösende synthetische Haushaltslastprofile. In: *12. Symposium Energieinnovation, 25.-17.02.2012.*

-
- Zhang, S.; Worrell, E.; Crijns-Graus, W.; Wagner, F.; Cofala, J. (2014): Co-benefits of energy efficiency improvement and air pollution abatement in the Chinese iron and steel industry. In: *Energy* 78, S. 333–345. DOI: 10.1016/j.energy.2014.10.018.
- ZVEI (2015): Elektrische Antriebe – Energieeffizienz wird zunehmend reglementiert. Hg. v. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Frankfurt am Main.

A. Anhang: Kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland

Tabelle A-1: Berechnung des verarbeiteten Kunststoffgranulats [1.000 t] in der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland im Jahr 2015 auf 6-Steller-Ebene der Wirtschaftszweige

WZ	Einheit	Menge ^{1,2)}	κ ³⁾	Quelle	Einheit	Menge ^{1,2)}	κ ³⁾	Quelle	Summe ¹²⁾ 1.000 t
22	-	-	-		-	-	-		11.933
22.21	-	-	-		-	-	-		5.362
22.21.10	t	803.159	-		-	-	-		803
22.21.21	t	518.349	-		-	-	-		518
22.21.29	t	457.954	-		-	-	-		458
22.21.30	t	2.379.445	-		-	-	-		2.381
22.21.41	t	571.811	-		-	-	-		572
22.21.42	t	629.636	-		-	-	-		629
22.22	-	-	-		-	-	-		3.251
22.22.11	t	484.597	-		-	-	-		485
22.22.12	t	14.194	-		-	-	-		14
22.22.13	t	585.406	-		-	-	-		585
22.22.14	1.000 St	20.695.807	$3,1e^{-2}$ 4)		-	-	-		645
22.22.19	t	510.746	-		1000 St	404.536	$2,5e^{-3}$ 11)		1.522
22.23	-	-	-		-	-	-		1.051
22.23.11	1.000 m ²	57.161	$2,7e^{-3}$ 5)		-	-	-		154
22.23.12	1.000 St	12.588	$6,5e^{-3}$ 6)		-	-	-		82
22.23.13	1.000 St	236	$2,0e^{-2}$ 7)		-	-	-		5
22.23.14	1.000 St	29.618	$2,0e^{-2}$ 8)		-	-	-		592
22.23.15	1.000 m ²	.	.		-	-	-		.
22.23.19	t	216.417	-		-	-	-		216
22.23.20	St	132	$1,0e^1$ 9)		-	-	-		1
22.29	-	-	-		-	-	-		2.269
22.29.10	t	.	-		-	-	-		.
22.29.21	t	101.875	-		-	-	-		102
22.29.22	t	48.656	-		-	-	-		49
22.29.23	t	163.573	-		-	-	-		164
22.29.24	t	1.574	-		-	-	-		0
22.29.25	t	38.534	-		-	-	-		39
22.29.26	t	25.415	-		-	-	-		25
22.29.29	1.000 St	77.160	$1,9e^{-4}$ 10)		t	502.242	-		517
22.29.91	t	1.373.733	-		-	-	-		1.374

1) Statistisches Bundesamt (2017e)

3) Faktor für die Umrechnung der Einheiten 1.000 m², 1.000 St und St in die Einheit t.4) Referenzprodukt - Flaschen: $\kappa = 0,031$ kg/St Eigene Annahme basierend auf BGVZ (2015)5) Referenzprodukt - Bodenbeläge: $\kappa = 2,7$ kg/m² Eigene Berechnung6) Referenzprodukt - Wannen: $\kappa = 6,5$ kg/St Eigene Annahme basierend auf Graf (2018a)7) Referenzprodukt - Tanks (>300 l): $\kappa = 20$ kg/St Eigene Annahme basierend auf Graf (2018b)8) Referenzprodukt - Fenster/Türen: $\kappa = 20$ kg/St Eigene Berechnung9) Referenzprodukt - Sonstige: $\kappa = 10$ kg/St Eigene Annahme10) Referenzprodukt - Andere Teile: $\kappa = 0,19$ kg/St Eigene Berechnung11) Referenzprodukt - Fässer: $\kappa = 2,5$ kg/St Eigene Annahme basierend auf Kanister-Vertrieb (2018)12) Eigene Berechnung basierend auf Produktionsdaten (9-Steller-Ebene) gemäß Statistisches Bundesamt. Produktionsdaten in m² und St werden mittels Umrechnungsschlüssel (κ) in t umgerechnet. Consultic (2016) beziffert die verarbeitete Kunststoffmenge mit 12.060 kt beziffert. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden die κ -Faktoren um ± 25 % variiert. Die Güterproduktion schwankt zwischen 11.306 und 12.599 kt ($\pm 5,2$ %).

WZ Wirtschaftszweig

 κ Umrechnungsfaktor

. Zahlenwert geheim zu halten

- kein Wert

Tabelle A-2: Anteil der Wirtschaftszweige auf 6-Steller-Ebene am Endenergieverbrauch auf 4-Steller-Ebene

WZ	Produkt	Prozess	SEC ¹⁾	EEV ²⁾	Anteil ³⁾
			kWh/kg	PJ	%
22	Kunststoffwaren	-	-	-	-
22.21	Platten, Folien, ...	-	-	-	100,00
22.21.10	Stäbe, Stangen, ...	P-EX	1,53	4,42	16,23
22.21.21	Rohre, Schläuche etc. (nicht biegsam)	P-EX	1,53	2,85	10,47
22.21.29	Rohre, Schläuche etc. (biegsam)	P-EX	1,53	2,52	9,25
22.21.30	Tafeln, Platten, ...	F-EX	1,35	11,60	42,57
22.21.41	Andere Tafeln, Platten, Folien	F-EX	1,35	2,79	10,22
22.21.42	Andere Tafeln, Platten, ... (ohne ZKS)	F-EX	1,35	3,07	11,25
22.22	Verpackungsmittel	-	-	-	100,00
22.22.11	Säcke, Beutel aus Ethylen	F-EX	1,35	2,36	10,75
22.22.12	Säcke, Beutel (ohne Ethylen)	F-EX	1,35	0,07	0,31
22.22.13	Dosen, Kisten, ...	TF	0,91	1,92	8,73
22.22.14	Ballons, Flaschen, ...	BF	2,22	5,15	23,47
22.22.19	Andere Verpackungsmittel	SG/BF	2,27	12,46	56,73
22.23	Baubedarfsartikeln	-	-	-	100,00
22.23.11	Bodenbeläge, Wand- und Deckenverkleidung	EX	1,35	0,75	11,79
22.23.12	Badewannen, Duschen etc.	SG	2,38	0,70	11,00
22.23.13	Tanks, Bottiche	BF	2,22	0,04	0,59
22.23.14	Türen, Fenster	EX	1,53	3,26	51,18
22.23.15	Linoleum Fußbodenbeläge	-	-	-	-
22.23.19	Beschläge, Dübel etc.	EX/SG	2,07	1,61	25,26
22.23.20	Vorgefertigte Gebäude	SG	2,38	0,01	0,18
22.29	Sonstige Kunststoffwaren	-	-	-	100,00
29.29.10	Bekleidung und Bekleidungszubehör	-	-	-	-
22.29.21	Haushalt etc.	SG	2,38	0,87	4,53
22.29.22	Andere Tafeln, Platten, ...	F-EX	1,35	0,24	1,23
22.29.23	Geschirr etc.	SG	2,38	1,40	7,28
22.29.24	Teile für Beleuchtungskörper	SG	2,38	0,00	0,00
22.29.25	Büroartikel	SG	2,38	0,33	1,71
22.29.26	Beschläge, Statuetten etc.	SG	2,38	0,22	1,13
22.29.29	Andere Teile	SG	2,38	4,43	22,99
22.29.91	Technische Teile	SG	2,38	11,77	61,12

¹⁾ Spezifischer Endenergieverbrauch eines typischen Betriebs mit Anlagen vom Typ Extrusion, Spritzguss, Blasformen und Thermoformen, basierend auf Ergebnissen einer Literatursichtung (s. Tabelle 6-3, S. 98) ergänzt um eigene Berechnungen und Annahmen.

²⁾ Bottom-up Berechnung des Endenergieverbrauchs durch Multiplikation der Produktionsmenge des Wirtschaftszweigs (s. Tabelle A-2) mit dem spezifischen Endenergieverbrauch (SEC).

³⁾ Berechnung des prozentualen Anteils der Wirtschaftszweige auf 9-Steller-Ebene am Endenergieverbrauch auf 4-Steller-Ebene.

WZ	Wirtschaftszweig
SEC	Spezifischer Energieverbrauch
EEV	Endenergieverbrauch
F-EX	Folienextrusion
P-EX	Profilextrusion
SG	Spritzguss
BF	Blasformen
TF	Thermoformen
ZKS	Zellkunststoffe
.	Zahlenwert geheim zu halten
-	kein Wert

Tabelle A-3: Endenergieverbrauch der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland im Jahr 2015 auf 6-Steller-Ebene (berechnet aus 9-Steller)

WZ	Endenergieverbrauch [PJ]						
	Gesamt ^{1,2)}	Kohle ³⁾	Mineralöl ³⁾	Gase ³⁾	EE ³⁾	Wärme ³⁾	Strom ³⁾
22	67,05	.	2,34	16,45	.	2,70	42,07
22.21	29,29	.	0,95	7,94	.	1,78	15,51
22.21.10	4,75	.	0,15	1,29	.	0,29	2,52
22.21.21	3,07	.	0,10	0,83	.	0,19	1,62
22.21.29	2,71	.	0,09	0,74	.	0,16	1,44
22.21.30	12,47	.	0,40	3,38	.	0,76	6,60
22.21.41	2,99	.	0,10	0,81	.	0,18	1,59
22.21.42	3,30	.	0,11	0,89	.	0,20	1,75
22.22	13,09	-	0,36	1,75	.	0,14	10,79
22.22.11	1,41	-	0,04	0,19	.	0,02	1,16
22.22.12	0,04	-	0,00	0,01	.	0,00	0,03
22.22.13	1,14	-	0,03	0,15	.	0,01	0,94
22.22.14	3,07	-	0,08	0,41	.	0,03	2,53
22.22.19	7,43	-	0,20	0,99	.	0,08	6,12
22.23	4,12	-	0,26	1,72	0,25	-	1,82
22.23.11	0,49	-	0,03	0,20	0,03	-	0,22
22.23.12	0,45	-	0,03	0,19	0,03	-	0,20
22.23.13	0,02	-	0,00	0,01	0,00	-	0,01
22.23.14	2,11	-	0,13	0,88	0,13	-	0,93
22.23.15	-	-	-	-	-	-	-
22.23.19	1,04	-	0,07	0,43	0,06	-	0,46
22.23.20	0,01	-	0,00	0,00	0,00	-	0,00
22.29	20,55	-	0,77	5,04	0,07	0,73	13,95
29.29.10	-	-	-	-	-	-	-
22.29.21	0,93	-	0,03	0,23	0,00	0,03	0,63
22.29.22	0,25	-	0,01	0,06	0,00	0,01	0,17
22.29.23	1,50	-	0,06	0,37	0,00	0,05	1,02
22.29.24	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22.29.25	0,35	-	0,01	0,09	0,00	0,01	0,24
22.29.26	0,23	-	0,01	0,06	0,00	0,01	0,16
22.29.29	4,73	-	0,18	1,16	0,02	0,17	3,21
22.29.91	12,56	-	0,47	3,08	0,04	0,44	8,53

¹⁾ Der Endenergieverbrauch auf 9-Steller-Ebene wurde beim Statistischen Bundesamt angefragt, konnte jedoch nicht zur Verfügung gestellt werden: „Die Erhebung über die Energieverwendung der Betriebe des verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden wird nach Wirtschaftszweigen (WZ 2008) bis zum WZ 4-Steller erfasst (Anlage 1). Das Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken findet hier keine Anwendung. Daher sind Auswertungen nach einzelnen Produkten für diese Statistik nicht möglich.“ (Antwort des statistischen Bundesamts vom 20.12.2017).

²⁾ Berechnung des Endenergieverbrauchs je Wirtschaftszweig auf 9-Steller-Ebene durch Multiplikation des Endenergieverbrauchs auf 4-Steller-Ebene (s. Tabelle 6-2, S. 91) mit den relativen Anteilen aus Tabelle A-2.

³⁾ Die Berechnung des Endenergieverbrauchs der Energieträger auf 9-Steller-Ebene erfolgt analog zur Berechnung des kumulierten Endenergieverbrauchs. Dies unterliegt der Annahme, dass die Struktur der Energieträger auf 9-Steller-Ebene innerhalb des übergeordneten Wirtschaftszweigs auf 4-Steller-Ebene entspricht.

WZ	Wirtschaftszweig
EE	Erneuerbare Energien
.	Zahlenwert geheim zu halten
-	kein Wert

Kunststoffpolymere

Die Tabelle A-4 zeigt eine Auswahl an gängigen Kunststoffpolymeren sowie deren Zugehörigkeit zu den Gruppen amorpher Standardthermoplast, amorpher technischer Thermoplast, teilkristalliner Standardthermoplast und teilkristalliner technischer Thermoplast. Ferner sind den aufgeführten Kunststoffpolymeren die Verarbeitungsverfahren Spritzgießen, Extrusion und Thermoformen zugeordnet.

Tabelle A-4: Kunststoffpolymere und deren Verarbeitung¹⁾

Abk.	Name	Gruppe	Verfahren
PS	Polystyrol	Amorpher Standardthermoplast	Spritzgießen
SBS	Styrol-Butadien-Styrol-Copolymere		Spritzgießen, Extrusion, Thermoformen
PVC	Polyvinylchlorid		Extrusion
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere	Amorpher technischer Thermoplast	Spritzgießen, Extrusion
PC	Polycarbonat		alle ²⁾
PMMA	Polymethylmethacrylat		Spritzgießen, Extrusion
PE	Polyethylen	Teilkristalliner Standardthermoplast	alle ²⁾
PP	Polypropylen		alle ²⁾
PA	Polyamid	Teilkristalliner technischer Thermoplast	alle ²⁾
PBT	Polybutylenterephthalat		Spritzgießen
PET	Polyethylenterephthalat		Spritzgießen
POM	Polyoxymethylen		alle ²⁾

¹⁾ Zusammenstellung basierend auf Bonten (2016).

²⁾ Alle umfasst hier für die Bearbeitung von Thermoplaste üblichen Verfahren (Bonten 2016).

Abk. Abkürzung

Charakterisierung der Typbetriebe

Die Tabelle A-5 zeigt die Definition charakteristischer Typbetriebe für die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland (vgl. Abschnitt 6.1.3). Dabei sind für die unterschiedlichen Typbetriebe die zugrundeliegenden Wirtschaftszweige, die hergestellten Produkte (inkl. Produktionsmengen) sowie die eingesetzten Kunststoffpolymere dargestellt.

Tabelle A-5: Definition charakteristischer Typbetriebe für die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland

	Einheit	Stangen, Rohre	Folien	Verpackungen	Flaschen	Baubedarf	Technische Teile
WZ	-	22.21.10 22.21.21 22.21.29	22.21.30 22.21.42 22.22.11	22.22.13 22.22.19	22.22.14	22.23.14 22.23.19	22.29.29 22.29.91
Betriebe	#	144	213	227	47	431	1.145
Produkt 1	-	Stangen	Folien	Dosen	Flaschen	Profile	Andere Teile
Produkt 2	-	Rohre	Folien	Deckel	Flaschen	Verkleidung	Techn. Teile
Produkt 3	-	Rohre	-	Fässer	-	Dübel	-
Produkt 4	-	Rohre	-	-	-	-	-
Menge 1	kt	579	1.837	585	284	592	517
Menge 2	kt	181	289	382	45	80	1.374
Menge 3	kt	94	-	1.140	-	137	-
Menge 4	kt	170	-	-	-	-	-
Polymer 1	-	PVC	Standard (teilkristallin)	Standard (teilkristallin)	PET	Standard (amorph)	Standard (teilkristallin)
Polymer 2	-	PE	Standard (teilkristallin)	Standard (teilkristallin)	PE-HD	Standard (amorph)	Technisch (teilkristallin)
Polymer 3	-	PP	-	Standard (teilkristallin)	-	Technisch (teilkristallin)	-
Polymer 4	-	PE	-	-	-	-	-
WZ	Wirtschaftszweig						
#	Anzahl						

B. Anhang: Daten und Rahmenannahmen

Charakterisierung der Technologiebestandsstruktur der Typbetriebe

Tabelle B-1 zeigt den im Zuge der Szenarioanalyse angenommenen Bestand der Typbetriebe.

Tabelle B-1: Angenommene Technologiebestandsstruktur der Typbetriebe¹⁾

Kategorie	Einheit	Stangen, Folien Rohre	Verpa- ckungen	Flaschen	Baube- darf	Tech. Teile	Deutsch- land	
Anzahl Motorensysteme	Stk.	157	139	110	96	62	100	222.919
Anwendung ²⁾								
Ventilatoren	%	39,49	25,90	18,18	34,38	32,26	22,00	25,34
Pumpen	%	43,31	7,91	26,36	22,92	37,10	30,00	28,72
Druckluftkompressoren	%	1,91	1,44	2,73	5,21	3,23	1,00	1,70
Kältekompressoren	%	1,27	1,44	3,64	6,25	3,23	3,00	2,78
Sonstige Motoren	%	14,01	63,31	49,09	31,25	24,19	44,00	41,46
Nennleistung ²⁾ [kW _{mech}]								
$P_{\text{mech}} < 11$	%	89,81	61,87	51,82	59,38	79,03	67,00	68,22
$11 \leq P_{\text{mech}} < 55$	%	8,92	35,97	31,82	27,08	20,97	26,00	25,66
$P_{\text{mech}} \geq 55$	%	1,27	2,16	16,36	13,54	0,00	7,00	6,12
Effizienzklasse ²⁾								
Gering	%	60,51	58,99	56,36	58,33	51,61	57,00	56,93
Standard	%	34,39	35,97	38,18	36,46	43,55	38,00	38,02
Hoch	%	5,10	5,04	5,45	5,21	4,84	5,00	5,05
BVT	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Drehzahlregelung ²⁾	%	15,29	16,55	15,32	14,58	16,13	16,00	15,91
Anzahl Leuchtmittel	Stk.	4.790	3.320	1.501	2.179	1.139	1.253	3,77e ⁶
Spezifische Leistung	W/m ²	7,95	6,68	6,45	6,52	6,51	6,50	6,76
Effizienzklasse ³⁾								
Gering	%	55,20	55,18	55,16	55,16	55,14	55,23	55,19
Standard	%	35,91	35,93	35,91	35,89	35,91	35,91	35,91
Hoch	%	8,20	7,56	7,46	7,48	7,46	7,42	7,60
BVT	%	0,90	1,33	1,47	1,47	1,49	1,44	0,90
Spez. Heizleistung (Büro)	W/m ²	153,06	154,15	162,49	116,52	126,52	141,24	142,04
Spez. Heizleistung (Prod.)	W/m ²	47,55	56,93	70,20	73,61	39,28	50,79	51,41

¹⁾ Eigene Berechnungen und Annahmen basierend auf den in Abschnitt 5.3 (Tabelle 6-3, S. 98) dargelegten Studien und Berichten, den relevanten Ökodesignrichtlinien (Europäisches Parlament und Rat 2012, 2011, 2009a, 2009b), den Vorstudien zu den Ökodesignrichtlinien (van Elburg und von den Boorn 2017; van Tichelen et al. 2017; Kubiak et al. 2015; Almeida et al. 2014; Falkner und Dollard 2008a, 2008b; Radgen und Oberschmidt 2008), Grundlagenliteratur zur kunststoffverarbeitenden Industrie (Hopmann et al. 2017; Greif et al. 2017; Bonten 2016; Bruder 2016; Hopmann und Michaeli 2015; Johannaber 2008; Thielen et al. 2006; Johannaber 2004), Grundlagenliteratur zu Querschnittstechnologien (Binder 2012; Gebhardt et al. 2008; Recknagel et al. 2007; Menny 2006; Ruppelt 2003; Grundmann und Schönholtz 1999) sowie weiterer Sekundärliteratur (BDEW 2018; Hirzel 2017; Blesl und Kessler 2017; ZVEI 2015; Blesl und Kessler 2013; Rosenkranz et al. 2011; Pehnt 2010; EnergieAgentur Ravensburg o. J.).

²⁾ Relativer Bestand gemessen an der Stückzahl.

³⁾ Relativer Leuchtmittelbestand gemessen am Lichtstrom (lm).

Preisindizes der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte

Die Tabelle B-2 zeigt die Jahresdurchschnittswerte der Preisindizes der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte. Diese werden zur Umrechnung von Preisangaben der Energieeffizienzmaßnahmen in das Basisjahr 2015 verwendet (s. Abschnitt 5.3.1).

Tabelle B-2: Jahresdurchschnittswerte der Preisindizes der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Fachserie 17, Reihe 2), (Statistisches Bundesamt 2018a)

2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
79,5	81,9	81,4	82,8	84,2	87,8	92,6	93,8	99,0	94,8	96,2	101,3	103,0	102,9	101,9	100,0	98,4

Wechselkurse

Die Tabelle B-3 zeigt die Umrechnungskurse für ausgewählte Währungen bezogen auf EUR für den Zeitraum 2001 bis 2017. Diese werden zur Umrechnung von Preisangaben der Energieeffizienzmaßnahmen in die Währung EUR verwendet (s. Abschnitt 5.3.1).

Tabelle B-3: Umrechnungskurse ausgewählter Währungen bezogen auf EUR

Jahr	US Dollar	Kanadische Dollar	Britisches Pfund	Schwedische Krone	Quelle
2017	1,1076	1,4541	0,8721	9,5863	1)
2016	1,1068	1,4659	0,8195	9,4689	2)
2015	1,1095	1,4186	0,7258	9,3535	2)
2014	1,3285	1,4661	0,8383	9,0985	2)
2013	1,3281	1,3684	0,8493	8,6515	3)
2012	1,2848	1,2842	0,8109	8,7041	3)
2011	1,3920	1,3761	0,8679	9,0298	3)
2010	1,3257	1,3651	0,8578	9,5373	3)
2009	1,3948	1,5850	0,8909	10,6191	3)
2008	1,4708	1,5594	0,7963	9,6152	3)
2007	1,3705	1,4678	0,6843	9,2501	3)
2006	1,2556	1,4237	0,6817	9,2544	3)
2005	1,2441	1,5087	0,6838	9,2822	3)
2004	1,2439	1,6167	0,6787	9,1243	3)
2003	1,1312	1,5817	0,6920	9,1242	3)
2002	0,9456	1,4838	0,6288	9,1611	3)
2001	0,8956	1,3864	0,6219	9,2551	3)

1) Eigene Zusammenstellung basierend auf Jahresdurchschnitt (01.01.17 bis 09.09.17) der European Central Bank (2017).

2) Eigene Zusammenstellung basierend auf Jahresdurchschnitt gemäß European Central Bank (2017).

3) Entnommen aus Brunke (2017) basierend auf Jahresdurchschnitt gemäß European Central Bank (2013).

Kostenfunktionen der Energieeffizienzmaßnahmen

Die Tabelle B-4 bis Tabelle B-10 zeigen die Kostenfunktionen für die spezifische Investition (inkl. Montage), die Veränderung der betriebsgebundenen Kosten sowie die Nutzungsdauer (s. Abschnitt 4.3) der identifizierten Energieeffizienzmaßnahmen für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Querschnittstechnologien (s. Abschnitt 5.3.1 und 5.3.2). Dabei wird jede Energieeffizienzmaßnahme durch eine individuelle Nummer charakterisiert, die sich aus zwei Buchstaben gefolgt von zwei Zahlen zusammensetzt (bspw. ‚EM02‘ für die Energieeffizienzmaßnahme ‚Dimensionierung Elektromotor‘). Bei der Anwendung der Tabellen ist darauf zu achten, dass die Bezugsgröße ‚x‘ für einige Technologien variiert.

Tabelle B-4: Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Elektromotoren¹⁾

Kenngröße		Spez. Investition (inkl. Montage)		Δ Spez. betriebsgebundene Kosten		Nutzungsdauer
Einheit		EUR/x		EUR/a		a
Funktion zur Bestimmung d. Kenngröße		$y = a * x^b$		$y = a * x^b$		-
Energieeffizienzmaßnahme	Bezugsgröße x	a	b	a	b	-
EM01 Zeitgesteuerte Abschaltung	kW _{mech}	15,0	1,000	-	-	15
EM02 Dimensionierung Elektromotor	kW _{mech}	170,6	-0,199	-	-	15
EM03 Effiziente Kraftübertragung	kW _{mech}	28,5	-0,377	-	-	15
EM04 Effizienter Elektromotor	kW _{mech}	148,9	-0,197	-	-	15
EM05 Frequenzumrichter	kW _{mech}	324,3	-0,421	-	-	10
EM06 Wartung Elektromotor	kW _{mech}	268,0	-0,885	-	-	3

¹⁾ Eigene Berechnung, basierend auf (Küenle Antriebssysteme 2016; Jung 2016; Siemens AG 2015a, 2015b; Kemmerich Elektromotoren 2015; VEM 2015; Gefran 2013; McKane und Hasanbeigi 2011), ergänzt um eigene Annahmen.

Tabelle B-5: Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Pumpensystemen¹⁾

Kenngröße		Spez. Investition (inkl. Montage)		Δ Spez. betriebsge- bundene Kosten		Nutzungs- dauer
Einheit		EUR/x		EUR/a		a
Funktion zur Bestimmung d. Kenngröße		$y = a * x^b$		$y = a * x^b$		-
Energieeffizienzmaßnahme	Bezugsgröße x	a	b	a	b	-
PU01 Dimensionierung Pumpe ²⁾	m ³ /h	601,1	-0,648	-	-	20
Dimensionierung Pumpe ³⁾	m ³ /h	55,6	-0,401	-	-	20
PU02 Beseitigung Leckagen	kW _{mech}	293,7	-0,675	-	-	5
PU03 Reduktion der Druckverluste	kW _{mech}	2.566,1	-0,806	-	-	10
PU04 Effizientere Pumpe ²⁾	m ³ /h	528,2	-0,647	-	-	20
Effizientere Pumpe ³⁾	m ³ /h	48,4	-0,401	-	-	20
PU05 Wartung Pumpe	kW _{mech}	570,2	-0,547	-	-	4
PU06 Zeitgesteuerte Abschaltung	kW _{mech}	15,0	1,000	-	-	15
PU07 Dimensionierung Elektromotor	kW _{mech}	170,6	-0,199	-	-	15
PU08 Effiziente Kraftübertragung	kW _{mech}	28,5	-0,377	-	-	15
PU09 Effizienter Elektromotor	kW _{mech}	148,9	-0,197	-	-	15
PU10 Frequenzumrichter	kW _{mech}	324,3	-0,421	-	-	10
PU11 Wartung Elektromotor	kW _{mech}	268,0	-0,885	-	-	3

¹⁾ Eigene Berechnung, basierend auf (Grundfos 2016; Küenle Antriebssysteme 2016; Jung 2016; Calpeda 2015; GWE 2015; KSB 2015; Siemens AG 2015a, 2015b; ES 2015; Kemmerich Elektromotoren 2015; VEM 2015; Gefran 2013; McKane und Hasanbeigi 2011), ergänzt um eigene Annahmen.

²⁾ Rotationspumpen

³⁾ Verdrängerpumpen

Tabelle B-6: Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Ventilatorensystemen¹⁾

Kenngröße		Spez. Investition (inkl. Montage)		Δ Spez. betriebs- gebundene Kosten		Nutzungs- dauer
Einheit		EUR/x		EUR/a		a
Funktion zur Bestimmung d. Kenngröße		$y = a * x^b$		$y = a * x^b$		-
Energieeffizienzmaßnahme	Bezugsgröße x	a	b	a	b	-
VT01 Reduktion der Druckverluste	m ³ /h	6,2	-0,504	-	-	15
VT02 Dimensionierung Ventilator ²⁾	m ³ /h	5,7	-0,402	-	-	15
Dimensionierung Ventilator ³⁾	m ³ /h	7,8	-0,370	-	-	15
VT03 Effizienter Ventilator ²⁾	m ³ /h	5,6	-0,414	-	-	15
Effizienter Ventilator ³⁾	m ³ /h	7,1	-0,375	-	-	15
VT04 Wartung Ventilator	kW _{mech}	653,5	-0,575	-	-	4
VT05 Zeitgesteuerte Abschaltung	kW _{mech}	15,0	1,000	-	-	15
VT06 Dimensionierung Elektromotor	kW _{mech}	170,6	-0,199	-	-	15
VT07 Effiziente Kraftübertragung	kW _{mech}	28,5	-0,377	-	-	15
VT08 Effizienter Elektromotor	kW _{mech}	148,9	-0,197	-	-	15
VT09 Frequenzumrichter	kW _{mech}	324,3	-0,421	-	-	10
VT10 Wartung Elektromotor	kW _{mech}	268,0	-0,885	-	-	3

¹⁾ Eigene Berechnung, basierend auf (Helios 2016; TROX 2016; Küenle Antriebssysteme 2016; Jung 2016; comefri 2015; MAICO 2015; Pichler 2015; Ruck 2015; S&P 2015; Siemens AG 2015a, 2015b; ES 2015; Kemmerich Elektromotoren 2015; VEM 2015; Gefran 2013; McKane und Hasanbeigi 2011), ergänzt um eigene Annahmen.

²⁾ Axialventilator

³⁾ Radialventilator

Tabelle B-7: Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Druckluftsystemen¹⁾

Kenngröße		Spez. Investition (inkl. Montage)		Δ Spez. betriebsge- bundene Kosten		Nutzungs- dauer
Einheit		EUR/x		EUR/a		a
Funktion zur Bestimmung d. Kenngröße		$y = a * x^b$		$y = a * x^b$		-
Energieeffizienzmaßnahme	Bezugsgröße x	a	b	a	b	-
DL01 Beseitigung Leckagen	kW _{mech}	93,7	-0,036	-	-	15
DL02 Druckniveauabsenkung	kW _{mech}	40,2	-0,009	-	-	15
DL03 Reduzierung Druckverluste	kW _{mech}	38,2	-0,021	-	-	15
DL04 Dimensionierung Kompressor ²⁾	m ³ /s	27.017	-0,696	-	-	15
Dimensionierung Kompressor ³⁾	m ³ /s	71.204	-0,380	-	-	15
Dimensionierung Kompressor ⁴⁾	m ³ /s	157.068	-0,389	-	-	15
DL05 Effiziente Drucklufttrockner	m ³ /s	51.942	-0,478	-	-	15
DL06 Effizienterer Kompressor ²⁾	m ³ /s	22.685	-0,708	-	-	15
Effizienterer Kompressor ³⁾	m ³ /s	62.200	-0,378	-	-	15
Effizienterer Kompressor ⁴⁾	m ³ /s	136.205	-0,388	-	-	15
DL07 Übergeordnete Steuerung	m ³ /s	39.165	-0,385	-	-	15
DL08 Größerer Druckluftspeicher	m ³	2.027	-0,339	-	-	15
DL09 Austausch der Ansaugfilter	kW _{mech}	5,0	-0,200	-	-	3
DL10 Dimensionierung Elektromotor	kW _{mech}	170,6	-0,199	-	-	15
DL11 Effiziente Kraftübertragung	kW _{mech}	28,5	-0,377	-	-	15
DL12 Effizienter Elektromotor	kW _{mech}	148,9	-0,197	-	-	15
DL13 Frequenzumrichter	kW _{mech}	324,3	-0,421	-	-	10
DL14 Wartung Elektromotor	kW _{mech}	268,0	-0,885	-	-	3

¹⁾ Eigene Berechnung, basierend auf (AIRKO 2016; AREA 2016; RENNER 2016; Külenle Antriebssysteme 2016; Jung 2016; Siemens AG 2015a, 2015b; Kemmerich Elektromotoren 2015; VEM 2015; Parker 2015; Mark 2015; AEROTEC Kompressoren 2015; Schneider 2015; Gefran 2013; McKane und Hasanbeigi 2011), ergänzt um eigene Annahmen.

²⁾ Kolbenkompressor

³⁾ Schraubenkompressor

⁴⁾ Turbokompressor

Tabelle B-8: Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Kälteanlagen¹⁾

Kenngröße		Spez. Investition (inkl. Montage)		Δ Spez. betriebsge- bundene Kosten		Nutzungs- dauer
Einheit		EUR/x		EUR/a		a
Funktion zur Bestimmung d. Kenngröße		$y = a * x^b$		$y = a * x^b$		-
Energieeffizienzmaßnahme	Bezugsgröße x	a	b	a	b	-
KM01 Dämmung der Kälteanlage	kW _{mech}	50,0	1,000	-	-	15
KM02 Freie Kühlung (Winter)	kW _{mech}	122,5	-0,066	-	-	15
KM03 Anheben Verdampfungstemp.	kW _{mech}	232,8	-0,593	-	-	15
KM04 Reinigung Wärmeübertrager	kW _{mech}	327,3	-0,638	-	-	1
KM05 Kondensationstemp.-Regelung	kW _{mech}	43,0	-0,109	-	-	15
KM06 Effizientere Kraftübertragung	kW _{mech}	28,5	-0,377	-	-	15
KM07 Effizienterer Verdichter	kW _{mech}	132,1	-0,180	-	-	15
KM08 Drehzahlgeregelte Verdichter	kW _{mech}	324,3	-0,421	-	-	10
KM09 Dimensionierung (Quelle)	kW _{mech}	170,6	-0,199	-	-	15
KM10 Effizienterer Motor (Quelle)	kW _{mech}	148,9	-0,197	-	-	15
KM11 Drehzahlregelung (Quelle)	kW _{mech}	324,3	-0,421	-	-	10
KM12 Dimensionierung (Senke)	kW _{mech}	170,6	-0,199	-	-	15
KM13 Effizienterer Motor (Senke)	kW _{mech}	148,9	-0,197	-	-	15
KM14 Drehzahlregelung (Senke)	kW _{mech}	324,3	-0,421	-	-	10

¹⁾ Eigene Berechnung, basierend auf (Helios 2016; TROX 2016; Kühlenle Antriebssysteme 2016; Jung 2016; Grundfos 2016; comeфри 2015; MAICO 2015; Pichler 2015; Ruck 2015; S&P 2015; Siemens AG 2015a, 2015b; ES 2015; Kemmerich Elektromotoren 2015; VEM 2015; Calpeda 2015; GWE 2015; KSB 2015; Kulterer und Mair 2013; Gefran 2013; McKane und Hasanbeigi 2011; CIAT 2006), ergänzt um eigene Annahmen.

Tabelle B-9: Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Heizungsanlagen¹⁾

Kenngröße		Spez. Investition (inkl. Montage)		Δ Spez. betriebsgebundene Kosten		Nutzungsdauer
Einheit		EUR/x		EUR/a		a
Funktion zur Bestimmung d. Kenngröße		$y = a * x^b$		$y = a * x^b$		-
Energieeffizienzmaßnahme	Bezugsgröße x	a	b	a	b	-
HT01 Gebäudedämmung (Dach, Wand)	m ²	246,8	-0,141	-	-	20
HT02 Wärmedämmverglasung	m ²	1.455,5	-0,255	-	-	20
HT03 Temperaturabsenkung	kW _{th}	21,5	-0,498	-	-	15
HT04 Wochenendabschaltung	kW _{th}	43,0	-0,498	-	-	15
HT05 WRG aus Druckluft	kW _{th}	796,1	-0,627	-	-	15
HT06 WRG aus Prozesskälte	kW _{th}	4.074,2	-0,703	-	-	15
HT07 Effizientere Heizung (Gas)	kW _{th}	881,8	-0,374	-	-	15
Effizientere Heizung (Heizöl)	kW _{th}	1.489,8	-0,429	-	-	15
HT08 Pelletheizung	kW _{th}	3.324,4	-0,542	0,062	1,000	15
HT09 Luftwärmepumpe	kW _{th}	5.357,1	-0,581	0,047	1,000	15
HT10 Erdwärmepumpe	kW _{th}	2.722,9	-0,196	0,047	1,000	15
HT11 Drehzahleregelte Umwälzpumpe	kW _{mech}	324,3	-0,421	-	-	10

¹⁾ Eigene Berechnung, basierend auf (Wolf 2018; Bubeck 2017; Jung 2016; Jagnow et al. 2014; Gefran 2013; LfU 2012), ergänzt um eigene Annahmen.

WRG Wärmerückgewinnung

Tabelle B-10: Kapital- und betriebsgebundene Kosten für Energieeffizienzmaßnahmen von Beleuchtungsanlagen¹⁾

Kenngröße		Spez. Investition (inkl. Montage)		Δ Spez. betriebsgebundene Kosten		Nutzungsdauer
Einheit		EUR/x		EUR/a		a
Funktion zur Bestimmung d. Kenngröße		$y = a * x^b$		$y = a * x^b$		-
Energieeffizienzmaßnahme	Bezugsgröße x	a	b	a	b	-
BL01 Tageslichtdimmen	lm	65,3	-1,109	-	-	15
BL02 Regeln nach Anwesenheit	lm	46,7	-1,154	-	-	15
BL03 Effizientere Beleuchtung	lm	8,8	-0,748	-	-	50.000

¹⁾ Eigene Berechnung, basierend auf (Jung 2016; Barthelme 2015; Environlight 2015; Osram 2015a, 2015b; Philips 2015), ergänzt um eigene Annahmen.

Energieträgerpreise und Energieträgerpreisentwicklung

Die Tabelle B-11 zeigt die reale Energieträgerpreisentwicklung der Energieträger elektrischer Strom, Erdgas, Heizöl, und Biomasse für den Zeitraum 2015 bis 2035. Dabei sind sowohl die Energieträgerpreisentwicklungen im Trendszenario als auch im positiven und negativen Extremszenario dokumentiert (s. Abschnitt 6.2).

Tabelle B-11: Energieträgerpreisentwicklung der Typbetriebe der kunststoffverarbeitenden Industrie im Trendszenario sowie im positiven und negativen Extremszenario (inkl. aller Steuern und Abgaben, exkl. Mehrwertsteuer) von 2015 bis 2035 [EUR-ct/kWh]

Jahr	Elektrischer Strom ¹⁾			Erdgas ¹⁾			Heizöl ¹⁾			Biomasse ¹⁾		
	Trend	Positiv	Negativ	Trend	Positiv	Negativ	Trend	Positiv	Negativ	Trend	Positiv	Negativ
2015	12,13	15,16	9,10	3,05	3,81	2,29	5,50	6,88	4,13	2,16	2,70	1,62
2016	12,16	15,31	9,10	3,06	3,85	2,29	5,51	6,94	4,13	2,17	2,73	1,62
2017	12,19	15,47	9,10	3,07	3,89	2,29	5,52	7,01	4,13	2,17	2,75	1,62
2018	12,22	15,62	9,10	3,07	3,93	2,29	5,54	7,08	4,13	2,18	2,78	1,62
2019	12,25	15,78	9,10	3,08	3,97	2,29	5,55	7,15	4,13	2,18	2,81	1,62
2020	12,28	15,94	9,10	3,09	4,01	2,29	5,56	7,23	4,13	2,19	2,84	1,62
2021	12,31	16,10	9,10	3,10	4,05	2,29	5,58	7,30	4,13	2,19	2,87	1,62
2022	12,34	16,26	9,10	3,10	4,09	2,29	5,59	7,37	4,13	2,20	2,89	1,62
2023	12,37	16,42	9,10	3,11	4,13	2,29	5,61	7,44	4,13	2,20	2,92	1,62
2024	12,41	16,58	9,10	3,12	4,17	2,29	5,62	7,52	4,13	2,21	2,95	1,62
2025	12,44	16,75	9,10	3,13	4,21	2,29	5,63	7,59	4,13	2,21	2,98	1,62
2026	12,47	16,92	9,10	3,13	4,25	2,29	5,65	7,67	4,13	2,22	3,01	1,62
2027	12,50	17,09	9,10	3,14	4,30	2,29	5,66	7,75	4,13	2,23	3,04	1,62
2028	12,53	17,26	9,10	3,15	4,34	2,29	5,68	7,82	4,13	2,23	3,07	1,62
2029	12,56	17,43	9,10	3,16	4,38	2,29	5,69	7,90	4,13	2,24	3,10	1,62
2030	12,59	17,60	9,10	3,17	4,43	2,29	5,70	7,98	4,13	2,24	3,13	1,62
2031	12,62	17,78	9,10	3,17	4,47	2,29	5,72	8,06	4,13	2,25	3,17	1,62
2032	12,66	17,96	9,10	3,18	4,52	2,29	5,73	8,14	4,13	2,25	3,20	1,62
2033	12,69	18,14	9,10	3,19	4,56	2,29	5,75	8,22	4,13	2,26	3,23	1,62
2034	12,72	18,32	9,10	3,20	4,61	2,29	5,76	8,31	4,13	2,26	3,26	1,62
2035	12,75	18,50	9,10	3,21	4,65	2,29	5,78	8,39	4,13	2,27	3,29	1,62

¹⁾ Eigene Berechnung, basierend auf (Bubeck 2017; Schlesinger et al. 2014)

C. Anhang: Weiterführende Ergebnisse

Im Folgenden werden weiterführende Ergebnisse für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten quantitativen Analysen dokumentiert.

Plausibilisierung der Technologiemoellierung

Die Abbildung C-1 bis Abbildung C-7 zeigen die Ergebnisse der Plausibilisierung der Technologiemoellierung (s. Abschnitt 5.4). Die Abbildungen fassen die Ergebnisse der durchgeführten Literatursichtung sowie der 2.415 durchgeführten Einzelparametervariationen für die betrachteten Querschnittstechnologien zusammen.

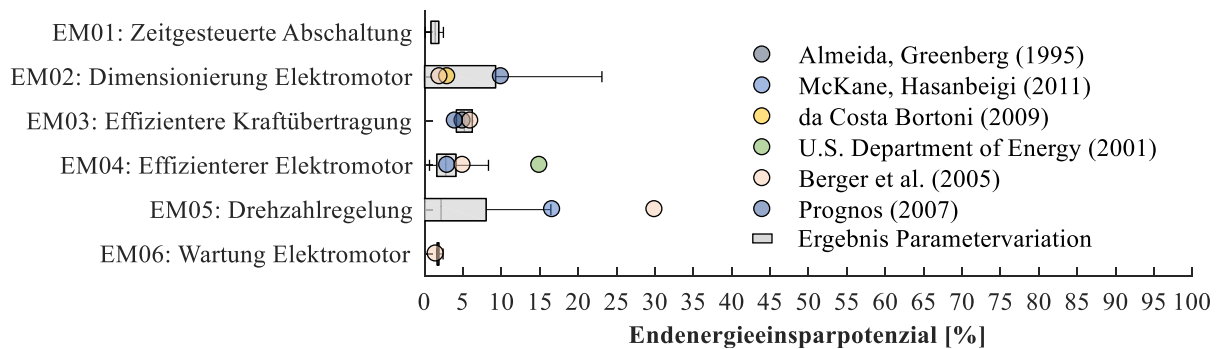


Abbildung C-1: Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Elektromotoren

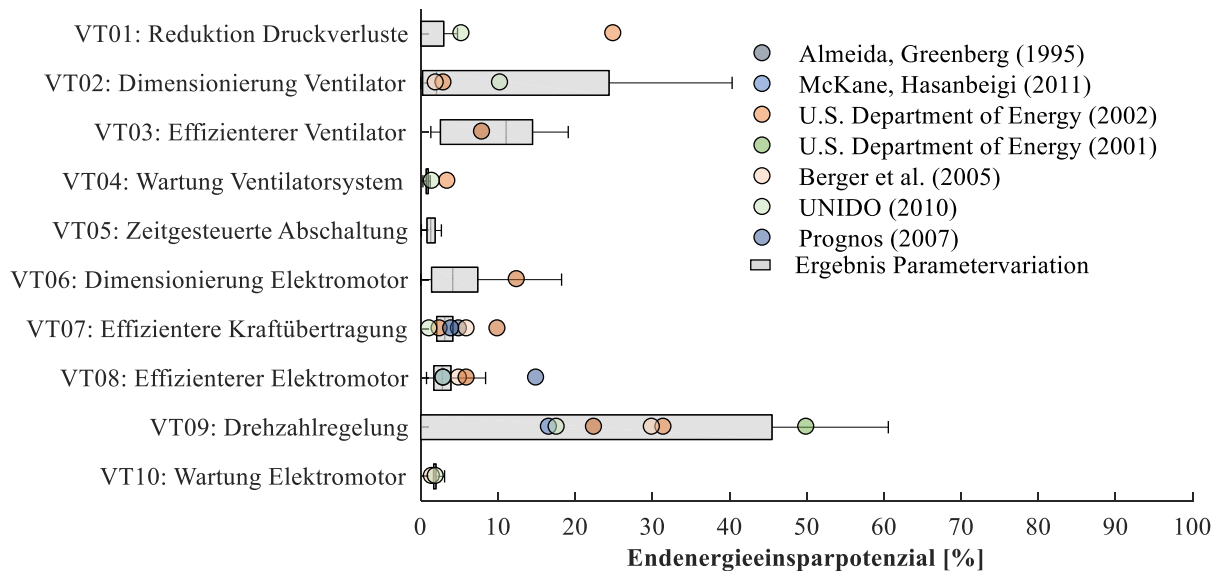


Abbildung C-2: Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Ventilatoren

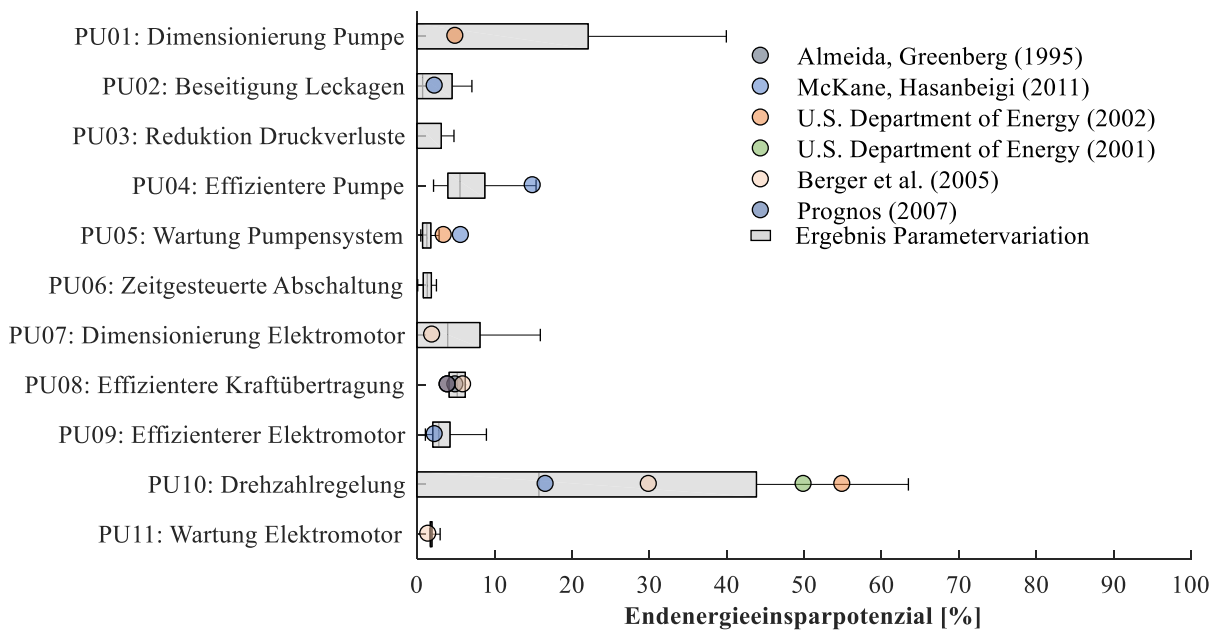


Abbildung C-3: Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Pumpen

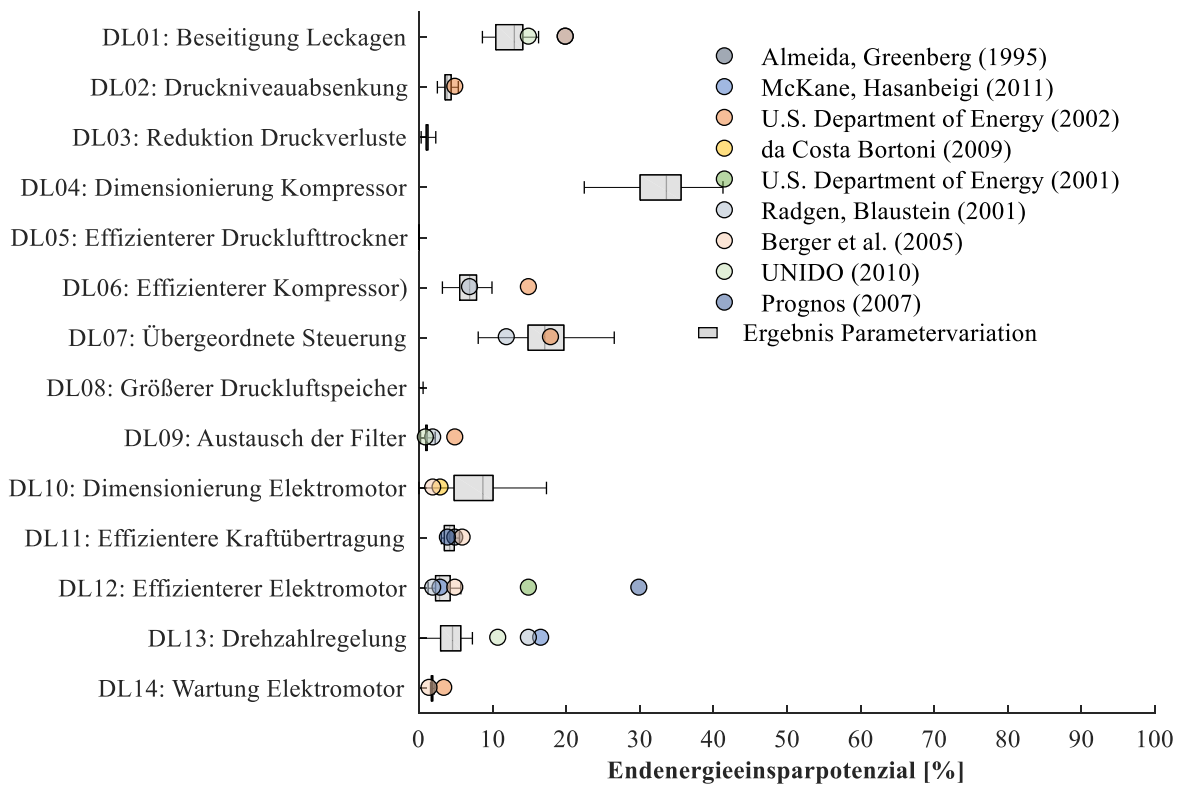


Abbildung C-4: Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Druckluft

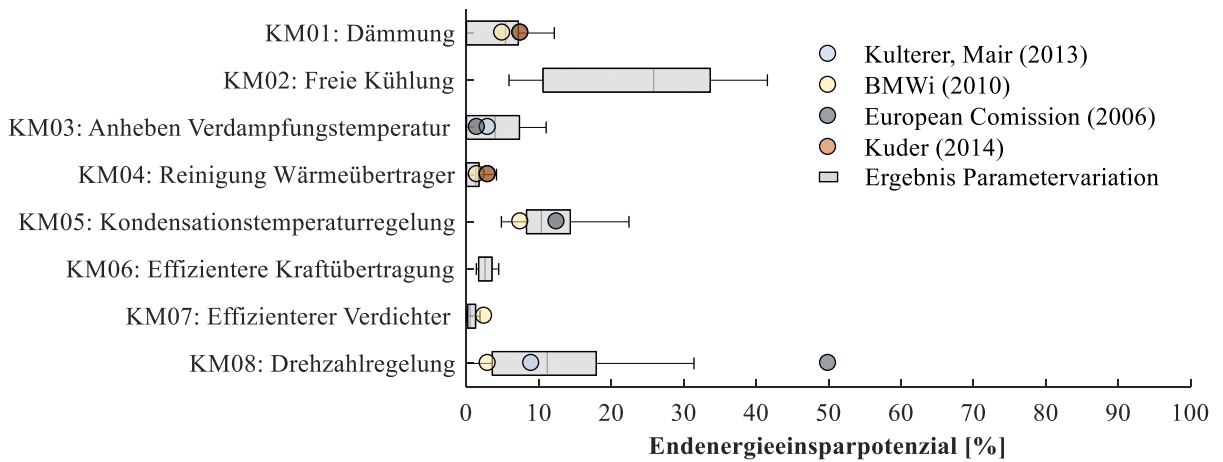


Abbildung C-5: Ergebnisse der Modellplausibilisierung für die Kälteerzeugung (auf die Darstellung der Ergebnisse für Maßnahmen im Quellen- und Senkenkreis wird zugunsten einer besseren Lesbarkeit verzichtet. Hier sei auf die Abbildung C-2 und Abbildung C-3 verwiesen.)

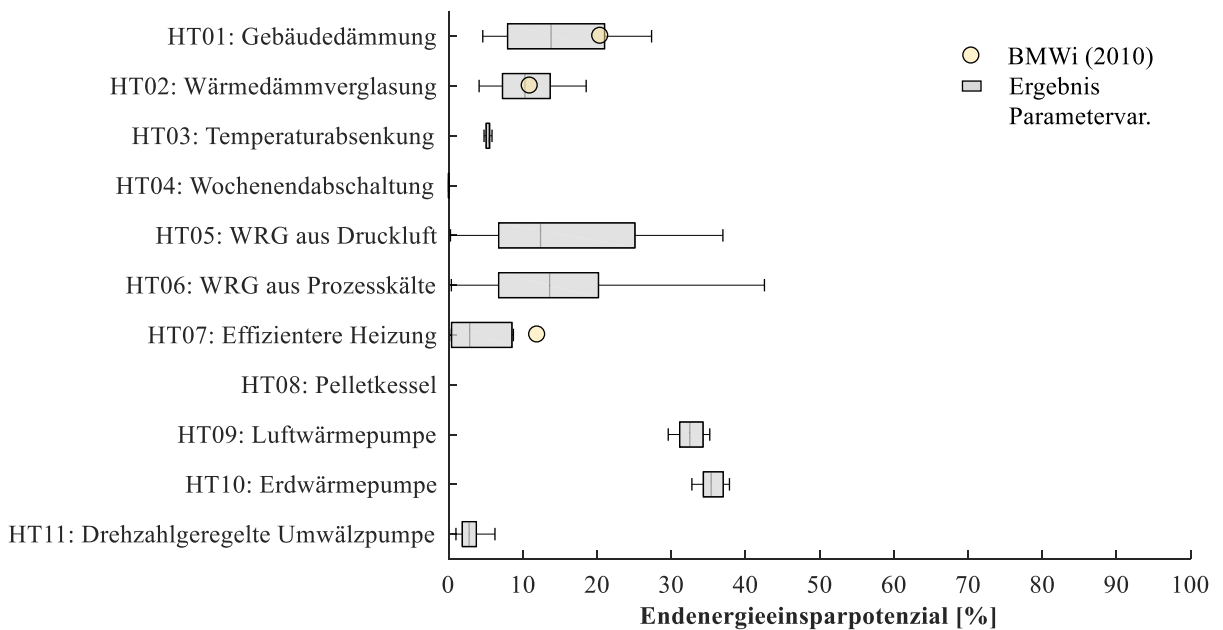


Abbildung C-6: Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Raumwärmebereitstellung in Gebäuden

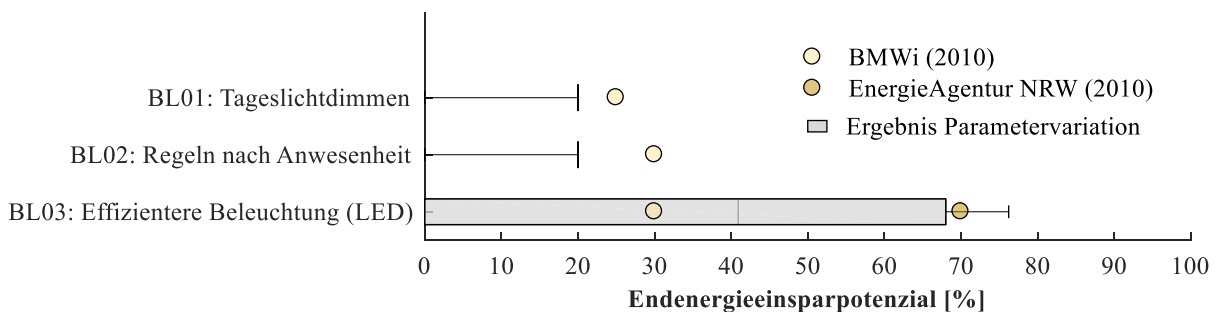


Abbildung C-7: Ergebnisse der Modellplausibilisierung für Beleuchtung

Ergebnisse der integrierten Bewertung im Trendszenario

Die Tabelle C-1 bis Tabelle C-4 zeigen die Ergebnisse der Potenzialanalyse für die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland auf Ebene der sechs betrachteten Typbetriebe im Trendszenario (s. Abschnitt 6.1). Gemäß den Ausführungen im Abschnitt 4.3 werden jeweils aller Energieeffizienzmaßnahmen eines Typs mit positiven bzw. negativen spezifischen Energieeinsparpotenzialen aggregiert dargestellt. Die Tabelle C-1 und Tabelle C-2 zeigen die gewichteten spezifischen Energieeinsparpotenziale respektive das Endenergieeinsparpotenzial der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparpotenzialen. In der Tabelle C-3 und Tabelle C-4 sind die gewichteten spezifischen Energieeinsparpotenziale respektive das Endenergieeinsparpotenzial der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparpotenzialen dokumentiert.

Tabelle C-1: Gewichtete spezifische Energieeinsparpotenziale der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparpotenzialen

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
EM01	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-16,8	0,0	0,0	0,0	0,0
EM02	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-103,6	-86,8	-102,8	-112,6	-86,3	0,0
EM03	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-131,2	-105,2	-102,7	-118,1	-95,1	-53,7
EM04	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-83,6	-49,3	-40,0	-62,4	-58,8	-29,6
EM05	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EM06	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-37,0	-31,8	0,0	0,0	0,0	0,0
PU01	Dimensionierung Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-10,6	0,0	-5,5	-131,3	0,0	-90,4
PU02	Beseitigung Leckagen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-84,5	0,0	0,0
PU03	Reduktion der Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-18,7	0,0	0,0
PU04	Effizientere Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	-92,2	-139,9	-83,3	-86,0
PU05	Wartung Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU07	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-105,3	-51,9	-107,5	-111,0	-85,8	-74,1
PU08	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-106,0	-92,2	-91,9	-132,1	-87,2	-86,4
PU09	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-7,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-53,9
PU10	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-127,3	-61,4	-48,6	-81,2	-105,8	-43,3
PU11	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT01	Reduktion der Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-71,7	0,0	0,0	0,0	0,0
VT02	Dimensionierung Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-37,3	-92,0	-60,3	0,0	0,0
VT03	Effizienterer Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-34,8	-92,4	-16,5	-52,0	0,0	0,0
VT04	Wartung Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT05	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-72,0	0,0	0,0
VT06	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-39,7	0,0	-88,8	0,0	-86,4
VT07	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-110,1	-121,0	-106,6	-104,5	-82,7	-56,6
VT08	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-73,2	-61,2	-95,1	-90,7	-43,2	0,0
VT09	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-83,7	-123,9	-99,2	-92,9	-71,8	-51,8
VT10	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL01	Beseitigung der Leckagen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-53,8	-91,4	-105,3	-125,7	-34,3	-100,1
DL02	Druckniveaubabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-119,3	0,0	0,0

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
DL03	Reduzieren Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL04	Dimensionierung Druckluftkomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL05	Effizientere Drucklufttrocknung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL06	Effizienterer Druckluftkompressor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-13,7	-56,8	-95,7	0,0	0,0
DL07	Übergeordnete Steuerung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-7,8
DL08	Größerer Druckluftspeicher	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-36,8	0,0	0,0	-64,3	-7,9
DL09	Austausch der Ansaugfilter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-20,1	-96,8	0,0	0,0	-74,4
DL10	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL11	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-114,7	-128,9	-127,3	-140,6	-64,6	-111,3
DL12	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	-15,3	-42,9	0,0	0,0
DL13	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-96,8	0,0	-109,2	0,0	0,0
DL14	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-71,1	-105,2	-119,2	0,0	0,0
KM01	Dämmung der Kälteanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-128,7	-117,5	-117,0	-89,9	-101,8	-117,5
KM02	Freie Kühlung (Winter)	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-137,0	-133,5	-132,7	-143,2	-125,8	-118,6
KM03	Anheben Verdampfungstemp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-109,2	-15,7	-124,7	0,0	-90,5
KM04	Reinigung Wärmeübertrager	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM05	Kondensationstemp.-Regelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-40,9	-131,4	0,0	-129,8	0,0	-96,8
KM06	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-93,4	-119,0	-141,7	-82,9	-111,9
KM07	Effizienterer Kältekompressor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM08	Drehzahlregelte Kältekomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-71,8	-81,6	-99,9	-135,9	-109,8	-97,4
KM09	Dimensionierung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-128,0	-141,4	-111,1	-126,0	0,0	-111,7
KM10	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-84,9	-134,3	-103,9	0,0	-4,8
KM11	Drehzahlregelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-93,7	-105,0	-78,0	-104,8	-20,1	-99,8
KM12	Dimensionierung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-98,2	0,0	-61,5	-27,2	0,0
KM13	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-53,6	0,0	-76,3	-94,1	-71,9	-63,4
KM14	Drehzahlregelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-124,0	-124,2	-135,2	-61,9	-106,7
HT01	Dämmung Wände + Dach	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT02	Wärmedämmverglasung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT03	Temperaturabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-28,8	-25,4	-24,7	-10,2	-28,8
HT04	Wochenendabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT05	WRG aus Druckluftanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-16,4	-23,7	-25,2	-26,8	0,0	-19,7
HT06	WRG aus Kälteanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-18,4	-4,7	-14,1	-21,5	0,0	0,0
HT07	Effizientere Heizung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT08	Pelletheizung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT09	Luftwärmepumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT10	Erdwärmepumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT11	Drehzahlregelung Umwälzpumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-59,9	-70,6	0,0	0,0	0,0	0,0
BL01	Tageslicht Dimmen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-56,3	-16,6	-54,8	-58,8	-15,2	-19,9
BL02	Regeln nach Anwesenheit	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-35,8	-46,0	-37,5	-41,4	-41,9	-44,9
BL03	Effizientere Beleuchtung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-75,2	-105,2	-78,1	-84,6	-95,5	-94,8

* Die Energieeffizienzmaßnahmen HZ08 bis HZ10 wurden im Trendszenario aufgrund einer Konkurrenz zur Energieeffizienzmaßnahme HZ07 nicht gezogen.

WRG Wärmerückgewinnung

Tabelle C-2: Energieeinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
EM01	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
EM02	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	8,5	70,8	75,0	92,3	4,6	0,0
EM03	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	4,9	7,6	9,2	4,6	0,9	2,0
EM04	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	56,7	41,4	15,0	6,8	7,4	18,8
EM05	Frequenzumrichter	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EM06	Wartung Elektromotor	MWh/a	2,7	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0
PU01	Dimensionierung Pumpe	MWh/a	15,3	0,0	3,5	8,1	0,0	4,5
PU02	Beseitigung Leckagen	MWh/a	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0	0,0
PU03	Reduktion der Druckverluste	MWh/a	0,0	0,0	0,0	6,8	0,0	0,0
PU04	Effizientere Pumpe	MWh/a	0,0	0,0	2,8	15,9	0,7	6,1
PU05	Wartung Pumpe	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU07	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	32,0	1,6	7,0	89,9	11,6	1,5
PU08	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	6,9	0,3	4,3	2,7	1,9	7,2
PU09	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	7,6	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6
PU10	Frequenzumrichter	MWh/a	379,6	4,1	9,7	28,0	42,6	5,2
PU11	Wartung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT01	Reduktion der Druckverluste	MWh/a	0,0	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0
VT02	Dimensionierung Ventilator	MWh/a	0,0	86,2	55,7	5,4	0,0	0,0
VT03	Effizienterer Ventilator	MWh/a	58,9	139,1	17,0	49,4	0,0	0,0
VT04	Wartung Ventilator	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT05	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
VT06	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	7,8	0,0	10,4	0,0	18,6
VT07	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	5,2	15,1	2,1	3,1	0,6	1,3
VT08	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	30,9	38,5	9,8	12,2	6,1	0,0
VT09	Frequenzumrichter	MWh/a	30,4	75,4	17,6	21,5	13,3	11,1
VT10	Wartung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL01	Beseitigung der Leckagen	MWh/a	15,7	35,0	84,8	231,0	4,0	19,9
DL02	Druckniveauabsenkung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	57,5	0,0	0,0
DL03	Reduzieren Druckverluste	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4
DL04	Dimensionierung Druckluftkomp.	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL05	Effizientere Drucklufttrocknung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL06	Effizienterer Druckluftkompressor	MWh/a	0,0	30,2	76,2	121,0	0,0	0,0
DL07	Übergeordnete Steuerung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,6
DL08	Größerer Druckluftspeicher	MWh/a	0,0	5,0	0,0	0,0	1,2	2,1
DL09	Austausch der Ansaugfilter	MWh/a	0,0	1,0	4,4	0,0	0,0	0,7
DL10	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL11	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	4,6	9,0	16,4	43,9	0,7	2,9
DL12	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	18,2	24,9	0,0	0,0
DL13	Frequenzumrichter	MWh/a	0,0	14,7	0,0	77,4	0,0	0,0
DL14	Wartung Elektromotor	MWh/a	0,0	4,6	14,8	11,4	0,0	0,0
KM01	Dämmung der Kälteanlage	MWh/a	15,8	8,9	12,5	52,7	2,9	11,0
KM02	Freie Kühlung (Winter)	MWh/a	126,7	82,7	133,5	406,9	52,5	48,6
KM03	Anheben Verdampfungstemp.	MWh/a	0,0	4,1	2,5	13,7	0,0	3,7
KM04	Reinigung Wärmeübertrager	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
KM05	Kondensationstemp.-Regelung	MWh/a	1,6	11,7	0,0	21,7	0,0	4,3
KM06	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	1,0	4,0	15,6	0,4	1,5
KM07	Effizienterer Kältekompressor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM08	Drehzahlregelte Kältekomp.	MWh/a	6,9	9,3	11,5	112,7	11,0	33,7
KM09	Dimensionierung	MWh/a	4,1	27,1	2,7	1,7	0,0	3,7
KM10	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	0,9	6,3	1,9	0,0	0,1
KM11	Drehzahlregelung	MWh/a	1,8	2,8	1,9	4,0	1,0	2,1
KM12	Dimensionierung	MWh/a	0,0	16,6	0,0	18,3	3,6	0,0
KM13	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	2,7	0,0	4,2	15,4	0,9	1,1
KM14	Drehzahlregelung	MWh/a	0,0	14,2	11,9	25,2	1,8	5,0
HT01	Dämmung Wände + Dach	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT02	Wärmedämmverglasung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT03	Temperaturabsenkung	MWh/a	0,0	42,3	14,1	14,1	3,7	22,8
HT04	Wochenendabsenkung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT05	WRG aus Druckluftanlage	MWh/a	74,2	161,1	170,5	262,6	0,0	82,9
HT06	WRG aus Kälteanlage	MWh/a	397,5	202,9	263,9	532,3	0,0	0,0
HT07	Effizientere Heizung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT08	Pelletheizung	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT09	Luftwärmepumpe	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT10	Erdwärmepumpe	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT11	Drehzahlregelung Umwälzpumpe	MWh/a	0,9	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0
BL01	Tageslicht Dimmen	MWh/a	11,9	5,1	3,3	4,6	1,9	2,2
BL02	Regeln nach Anwesenheit	MWh/a	36,1	5,0	9,9	13,4	1,9	2,2
BL03	Effizientere Beleuchtung	MWh/a	158,0	52,2	46,0	62,6	19,5	22,8

* Die Energieeffizienzmaßnahmen HZ08 bis HZ10 wurden im Trendszenario aufgrund einer Konkurrenz zur Energieeffizienzmaßnahme HZ07 nicht gezogen.

WRG Wärmerückgewinnung

Tabelle C-3: Gewichtete spezifische Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
EM01	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	116,9	77,7	0,0	118,5	0,0
EM02	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	84,9	0,0	0,0	0,0
EM03	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	239,6	0,0	0,0	270,8	205,1	839,7
EM04	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	676,4	71,7	205,8	81,3	370,6	205,6
EM05	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	215,8	274,8	93,0	>1.000	>1.000
EM06	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	488,3	>1.000	358,9	314,5
PU01	Dimensionierung Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	503,8	>1.000	0,0	0,0	751,8	0,0
PU02	Beseitigung Leckagen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	540,4	>1.000	>1.000	616,2
PU03	Reduktion der Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	448,7	>1.000	>1.000	>1.000
PU04	Effizientere Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	0,0	0,0	>1.000	0,0
PU05	Wartung Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	>1.000	>1.000	>1.000	>1.000
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	109,4	261,3	0,0	170,9	0,0
PU07	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	133,7	124,9	881,0	227,7	80,9	0,0
PU08	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU09	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	66,3	275,5	459,0
PU10	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	281,3
PU11	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	316,0	>1.000	>1.000	168,7	400,9	591,7
VT01	Reduktion der Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	108,8	51,2	155,6	61,0	349,1	232,9
VT02	Dimensionierung Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	629,6	0,0	0,0	0,0	173,5	0,0
VT03	Effizienterer Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	451,7	0,0	0,0	0,0	149,2	99,6
VT04	Wartung Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000	0,0	> 1.000
VT05	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	117,4	0,0	0,0	110,9	0,0
VT06	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT07	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	141,1	0,0	0,0	0,0	61,7	0,0
VT08	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	98,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT09	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT10	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	516,3	143,9	547,0	675,5	> 1.000	> 1.000
DL01	Beseitigung der Leckagen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL02	Druckniveaubasenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	280,2	127,5	187,9	0,0	383,8	3,9
DL03	Reduzieren Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	397,8	325,2	151,9	0,0	> 1.000	0,0
DL04	Dimensionierung Druckluftkomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL05	Effizientere Drucklufttrocknung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000
DL06	Effizienterer Druckluftkomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	421,7	0,0	0,0	0,0	> 1.000	0,0
DL07	Übergeordnete Steuerung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL08	Größerer Druckluftspeicher	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL09	Austausch der Ansaugfilter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	34,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL10	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL11	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL12	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	325,5	90,0	0,0	0,0	324,7	0,0
DL13	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	29,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL14	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	139,9	0,0	0,0	0,0	289,5	17,8
KM01	Dämmung der Kälteanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	311,1	0,0	0,0	469,8
KM02	Freie Kühlung (Winter)	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM03	Anheben Verdampfungstemp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	142,5
KM04	Reinigung Wärmeübertrager	EUR ₂₀₁₅ /MWh	652,8	> 1.000	> 1.000	827,2	> 1.000	> 1.000

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
KM05	Kondensationstemp.-Regelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	192,3	56,2	0,0	0,0
KM06	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM07	Effizienterer Kältekompressor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	472,0	200,5	183,9	199,7
KM08	Drehzahlregelte Kältekomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM09	Dimensionierung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	293,6
KM10	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	129,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM11	Drehzahlregelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM12	Dimensionierung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	87,9	0,0	0,0	0,0
KM13	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	217,0	1,0	10,9	349,5	609,7
KM14	Drehzahlregelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT01	Dämmung Wände + Dach	EUR ₂₀₁₅ /MWh	> 1.000	628,0	993,9	997,4	> 1.000	> 1.000
HT02	Wärmedämmverglasung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	402,2	361,8	> 1.000	731,6	529,0	406,2
HT03	Temperaturabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT04	Wochenendabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT05	WRG aus Druckluftanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	0,0
HT06	WRG aus Kälteanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	28,3	9,2
HT07	Effizientere Heizung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	238,3	318,5	498,3	524,8	146,7	281,2
HT08	Pelletheizung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT09	Luftwärmepumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT10	Erdwärmepumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT11	Drehzahlregelung Umwälzpumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	85,7	0,0	0,0
BL01	Tageslicht Dimmen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	73,8	187,4	82,5	86,8	172,4	156,9
BL02	Regeln nach Anwesenheit	EUR ₂₀₁₅ /MWh	225,4	185,4	223,6	225,4	164,6	152,1
BL03	Effizientere Beleuchtung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	270,3	245,2	256,1	262,2	228,3	208,8

* Die Energieeffizienzmaßnahmen HZ08 bis HZ10 wurden im Trendszenario aufgrund einer Konkurrenz zur Energieeffizienzmaßnahme HZ07 nicht gezogen.

WRG Wärmerückgewinnung

Tabelle C-4: Energieeinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
EM01	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,7	0,6	0,0	0,1	0,0
EM02	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0
EM03	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
EM04	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,4	11,5	25,4	5,1	1,2	11,5
EM05	Frequenzumrichter	MWh/a	1,1	11,1	13,1	4,9	0,1	0,2
EM06	Wartung Elektromotor	MWh/a	0,0	1,5	1,5	0,9	0,8	1,9
PU01	Dimensionierung Pumpe	MWh/a	1,4	0,1	0,0	0,0	0,3	0,0
PU02	Beseitigung Leckagen	MWh/a	0,6	0,1	0,4	0,2	0,0	0,1
PU03	Reduktion der Druckverluste	MWh/a	1,3	0,1	5,2	0,1	0,4	1,5
PU04	Effizientere Pumpe	MWh/a	1,7	0,5	0,0	0,0	0,4	0,0
PU05	Wartung Pumpe	MWh/a	0,9	0,0	1,7	1,0	0,5	1,7
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
PU07	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	4,0	0,2	5,9	8,1	1,6	0,0
PU08	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU09	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	6,4	1,1	12,1
PU10	Frequenzumrichter	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
PU11	Wartung Elektromotor	MWh/a	4,4	0,1	0,5	0,8	1,4	0,9
VT01	Reduktion der Druckverluste	MWh/a	6,8	6,9	3,2	5,1	2,4	2,3
VT02	Dimensionierung Ventilator	MWh/a	0,2	0,0	0,0	0,0	6,6	0,0
VT03	Effizienterer Ventilator	MWh/a	0,7	0,0	0,0	0,0	2,5	15,3
VT04	Wartung Ventilator	MWh/a	1,3	2,9	0,7	1,1	0,0	0,4
VT05	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
VT06	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT07	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT08	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT09	Frequenzumrichter	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT10	Wartung Elektromotor	MWh/a	2,7	6,7	1,3	2,5	0,5	0,7
DL01	Beseitigung der Leckagen	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL02	Druckniveauabsenkung	MWh/a	1,5	3,2	4,2	0,0	0,3	1,5
DL03	Reduzieren Druckverluste	MWh/a	1,1	1,7	4,3	0,0	0,1	0,0
DL04	Dimensionierung Druckluftkomp.	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL05	Effizientere Drucklufttrocknung	MWh/a	0,2	0,3	1,1	1,4	0,0	0,1
DL06	Effizienterer Druckluftkompressor	MWh/a	8,5	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0
DL07	Übergeordnete Steuerung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL08	Größerer Druckluftspeicher	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL09	Austausch der Ansaugfilter	MWh/a	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL10	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL11	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL12	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	2,6	6,1	0,0	0,0	0,9	0,0
DL13	Frequenzumrichter	MWh/a	7,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL14	Wartung Elektromotor	MWh/a	1,6	0,0	0,0	0,0	0,7	1,9
KM01	Dämmung der Kälteanlage	MWh/a	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	1,1
KM02	Freie Kühlung (Winter)	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM03	Anheben Verdampfungstemp.	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
KM04	Reinigung Wärmeübertrager	MWh/a	1,5	0,5	1,2	5,7	0,1	0,9

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
KM05	Kondensationstemp.-Regelung	MWh/a	0,0	0,0	0,3	1,1	0,0	0,0
KM06	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM07	Effizienterer Kältekompressor	MWh/a	0,0	0,0	1,0	3,8	0,8	1,0
KM08	Drehzahlregelte Kältekomp.	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM09	Dimensionierung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
KM10	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM11	Drehzahlregelung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM12	Dimensionierung	MWh/a	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0
KM13	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	0,5	1,9	1,0	0,1	0,3
KM14	Drehzahlregelung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT01	Dämmung Wände + Dach	MWh/a	143,2	444,2	150,1	192,7	39,8	74,7
HT02	Wärmedämmverglasung	MWh/a	46,6	69,2	20,5	46,9	28,3	68,7
HT03	Temperaturabsenkung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT04	Wochenendabsenkung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT05	WRG aus Druckluftanlage	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	23,5	0,0
HT06	WRG aus Kälteanlage	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	58,4	95,8
HT07	Effizientere Heizung	MWh/a	232,0	243,0	65,4	112,4	68,9	57,1
HT08	Pelletheizung	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT09	Luftwärmepumpe	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT10	Erdwärmepumpe	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT11	Drehzahlregelung Umwälzpumpe	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0
BL01	Tageslicht Dimmen	MWh/a	55,7	25,3	17,1	23,3	9,5	11,1
BL02	Regeln nach Anwesenheit	MWh/a	0,2	1,6	0,2	0,2	0,6	0,7
BL03	Effizientere Beleuchtung	MWh/a	52,1	51,8	18,2	25,6	19,3	22,7

* Die Energieeffizienzmaßnahmen HZ08 bis HZ10 wurden im Trendszenario aufgrund einer Konkurrenz zur Energieeffizienzmaßnahme HZ07 nicht gezogen.

WRG Wärmerückgewinnung

Ergebnisse der integrierten Bewertung im positiven Extremszenario

Die Tabelle C-5 bis Tabelle C-8 zeigen die Ergebnisse der Potenzialanalyse für die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland auf Ebene der sechs betrachteten Typbetriebe im positiven Extremszenario (s. Abschnitt 6.1). Gemäß den Ausführungen im Abschnitt 4.3 werden jeweils aller Energieeffizienzmaßnahmen eines Typs mit positiven bzw. negativen spezifischen Energieeinsparkosten aggregiert dargestellt. Die Tabelle C-5 und Tabelle C-6 zeigen die gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten respektive das Endenergieeinsparpotenzial der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten. In der Tabelle C-7 und Tabelle C-8 sind die gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten respektive das Endenergieeinsparpotenzial der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten dokumentiert.

Tabelle C-5: Gewichtete spezifische Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
EM01	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-86,9	-8,8	0,0	0,0	0,0
EM02	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-156,1	-143,4	-144,4	-167,4	-136,6	0,0
EM03	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-177,9	-158,6	-154,4	-175,0	-145,2	-116,4
EM04	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-143,0	-113,4	-75,8	-95,5	-109,8	-87,7
EM05	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-61,5	0,0	0,0
EM06	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-83,1	-84,5	0,0	0,0	0,0	-16,0
PU01	Dimensionierung Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-76,0	0,0	-70,4	-181,4	0,0	-136,9
PU02	Beseitigung Leckagen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-137,3	0,0	0,0
PU03	Reduktion der Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-36,7	0,0	0,0
PU04	Effizientere Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	-143,9	-184,8	-139,0	-133,2
PU05	Wartung Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	-22,3	0,0	0,0	0,0
PU07	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-134,8	-115,1	-156,1	-165,0	-123,8	-125,4
PU08	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-159,0	-161,2	-145,6	-182,7	-134,6	-135,3
PU09	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-9,7	-15,2	0,0	-41,1	-7,0	-104,1
PU10	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-174,7	-121,1	-101,7	-135,8	-152,4	-97,3
PU11	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-15,4	0,0	0,0
VT01	Reduktion der Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-68,2	-134,9	-23,0	-76,9	0,0	0,0
VT02	Dimensionierung Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-114,1	-153,9	-124,9	-70,0	0,0
VT03	Effizienterer Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-97,4	-139,4	-77,1	-120,3	0,0	-1,2
VT04	Wartung Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT05	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-134,3	0,0	0,0
VT06	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-148,4	0,0	-166,7	0,0	-135,2
VT07	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-158,8	-172,6	-147,2	-172,9	-131,2	-111,7
VT08	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-126,5	-125,3	-146,9	-147,6	-126,3	-103,7
VT09	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-153,7	-174,2	-149,7	-153,9	-93,7	-104,2
VT10	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-15,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL01	Beseitigung der Leckagen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-120,6	-152,9	-156,4	-186,4	-99,7	-146,3
DL02	Druckniveaubabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-39,9	0,0	-172,5	0,0	-62,4

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
DL03	Reduzieren Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-65,6
DL04	Dimensionierung Druckluftkomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL05	Effizientere Drucklufttrocknung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL06	Effizienterer Druckluftkompressor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-80,8	-117,4	-153,4	0,0	0,0
DL07	Übergeordnete Steuerung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-71,9
DL08	Größerer Druckluftspeicher	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-95,8	0,0	0,0	-118,6	-71,9
DL09	Austausch der Ansaugfilter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-53,3	-72,5	-143,3	0,0	0,0	-115,8
DL10	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL11	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-165,4	-176,7	-174,3	-189,6	-121,9	-155,5
DL12	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-20,7	-79,0	-113,9	0,0	0,0
DL13	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-36,1	-124,9	0,0	-171,7	0,0	0,0
DL14	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-114,1	-153,9	-169,7	0,0	-29,8
KM01	Dämmung der Kälteanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-176,2	-168,2	-171,1	-130,2	-149,0	-159,6
KM02	Freie Kühlung (Winter)	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-183,0	-184,9	-178,8	-192,5	-168,6	-162,9
KM03	Anheben Verdampfungstemp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-161,4	-84,6	-178,1	0,0	-130,9
KM04	Reinigung Wärmeübertrager	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM05	Kondensationstemp.-Regelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-179,4	0,0	-180,0	0,0	-139,7
KM06	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-148,7	-169,9	-190,6	-133,8	-156,1
KM07	Effizienterer Kältekompressor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-60,6	0,0	0,0
KM08	Drehzahleregelte Kältekomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-124,2	-136,7	-169,8	-182,9	-154,6	-142,6
KM09	Dimensionierung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-174,0	-187,4	-151,5	-180,0	0,0	-154,5
KM10	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-142,0	-127,5	-147,5	0,0	0,0
KM11	Drehzahlregelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-146,1	-156,6	-135,2	-161,1	-89,4	-129,6
KM12	Dimensionierung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-152,6	-48,8	-125,8	-88,8	0,0
KM13	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-133,9	0,0	-110,9	-149,8	-124,9	-133,1
KM14	Drehzahlregelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-169,3	-172,7	-164,0	-186,2	-119,5	-152,0
HT01	Dämmung Wände + Dach	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT02	Wärmedämmverglasung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT03	Temperaturabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-39,4	-36,8	-36,3	-23,3	-39,9
HT04	Wochenendabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT05	WRG aus Druckluftanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-29,1	-35,0	-36,2	-37,5	-11,6	-31,8
HT06	WRG aus Kälteanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-31,5	-20,5	-29,0	-33,2	-1,2	-12,2
HT07	Effizientere Heizung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT08	Pelletheizung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT09	Luftwärmepumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT10	Erdwärmepumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT11	Drehzahlregelung Umwälzpumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-115,4	-124,2	0,0	-19,2	0,0	0,0
BL01	Tageslicht Dimmen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-66,1	-80,8	-42,6	-47,0	-51,8	-75,0
BL02	Regeln nach Anwesenheit	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-98,2	-60,2	-99,0	-99,3	0,0	-58,9
BL03	Effizientere Beleuchtung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-132,2	-111,4	-124,5	-136,3	-109,5	-102,2

* Die Energieeffizienzmaßnahmen HZ08 bis HZ10 wurden im positiven Extremszenario aufgrund einer Konkurrenz zur Energieeffizienzmaßnahme HZ07 nicht gezogen.

WRG Wärmerückgewinnung

Tabelle C-6: Energieeinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
EM01	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,5	0,6	0,0	0,0	0,0
EM02	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	8,5	70,8	80,9	93,3	4,6	0,0
EM03	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	5,0	7,7	9,2	5,4	1,1	2,3
EM04	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	60,7	64,5	29,8	12,3	8,3	20,7
EM05	Frequenzumrichter	MWh/a	0,0	0,0	0,0	5,1	0,0	0,0
EM06	Wartung Elektromotor	MWh/a	2,6	4,0	0,0	0,0	0,0	1,8
PU01	Dimensionierung Pumpe	MWh/a	15,4	0,0	3,5	8,1	0,0	4,5
PU02	Beseitigung Leckagen	MWh/a	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0	0,0
PU03	Reduktion der Druckverluste	MWh/a	0,0	0,0	0,0	4,7	0,0	0,0
PU04	Effizientere Pumpe	MWh/a	0,0	0,0	2,8	16,3	1,7	6,1
PU05	Wartung Pumpe	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
PU07	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	40,0	1,6	7,1	89,4	13,4	1,5
PU08	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	7,2	0,4	4,3	2,7	1,7	7,2
PU09	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,7	0,2	0,0	5,0	1,9	5,1
PU10	Frequenzumrichter	MWh/a	385,1	4,1	12,2	32,9	49,0	6,0
PU11	Wartung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
VT01	Reduktion der Druckverluste	MWh/a	9,2	5,4	4,8	7,2	0,0	0,0
VT02	Dimensionierung Ventilator	MWh/a	0,0	49,2	71,0	5,4	15,8	0,0
VT03	Effizienterer Ventilator	MWh/a	56,8	167,8	15,8	50,7	0,0	8,4
VT04	Wartung Ventilator	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT05	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
VT06	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	16,0	0,0	17,1	0,0	18,6
VT07	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	5,2	16,6	1,5	4,8	0,7	1,3
VT08	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	32,4	40,0	9,4	11,7	3,4	0,7
VT09	Frequenzumrichter	MWh/a	82,4	84,4	17,5	24,1	7,0	11,1
VT10	Wartung Elektromotor	MWh/a	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
DL01	Beseitigung der Leckagen	MWh/a	16,8	40,7	84,9	441,6	4,3	19,9
DL02	Druckniveauabsenkung	MWh/a	0,0	4,7	0,0	57,5	0,0	1,5
DL03	Reduzieren Druckverluste	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4
DL04	Dimensionierung Druckluftkomp.	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL05	Effizientere Drucklufttrocknung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL06	Effizienterer Druckluftkompressor	MWh/a	0,0	29,2	76,3	121,0	0,0	0,0
DL07	Übergeordnete Steuerung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,6
DL08	Größerer Druckluftspeicher	MWh/a	0,0	4,7	0,0	0,0	1,2	2,1
DL09	Austausch der Ansaugfilter	MWh/a	0,7	1,0	4,4	0,0	0,0	0,6
DL10	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL11	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	4,7	8,5	16,6	43,9	0,7	3,0
DL12	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	6,9	17,4	25,8	0,0	0,0
DL13	Frequenzumrichter	MWh/a	7,6	9,0	0,0	23,8	0,0	0,0
DL14	Wartung Elektromotor	MWh/a	0,0	4,3	16,1	12,1	0,0	1,9
KM01	Dämmung der Kälteanlage	MWh/a	15,6	8,9	17,6	37,9	2,9	10,1
KM02	Freie Kühlung (Winter)	MWh/a	126,7	166,6	139,1	498,2	56,3	63,0
KM03	Anheben Verdampfungstemp.	MWh/a	0,0	4,1	2,5	14,6	0,0	3,0
KM04	Reinigung Wärmeübertrager	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
KM05	Kondensationstemp.-Regelung	MWh/a	0,0	11,7	0,0	24,8	0,0	3,7
KM06	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	1,0	4,7	15,9	0,4	1,5
KM07	Effizienterer Kältekompressor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	3,4	0,0	0,0
KM08	Drehzahlregelte Kältekomp.	MWh/a	6,5	9,3	27,3	107,0	11,0	33,3
KM09	Dimensionierung	MWh/a	4,3	27,2	2,0	2,0	0,0	5,3
KM10	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	0,9	0,4	2,1	0,0	0,0
KM11	Drehzahlregelung	MWh/a	1,8	2,8	2,1	4,3	1,1	2,3
KM12	Dimensionierung	MWh/a	0,0	16,6	2,6	18,3	3,6	0,0
KM13	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	3,7	0,0	5,4	17,3	0,9	2,8
KM14	Drehzahlregelung	MWh/a	19,5	14,2	7,7	29,1	2,0	5,4
HT01	Dämmung Wände + Dach	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT02	Wärmedämmverglasung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT03	Temperaturabsenkung	MWh/a	0,0	42,3	14,1	14,1	3,7	22,8
HT04	Wochenendabsenkung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT05	WRG aus Druckluftanlage	MWh/a	74,3	159,8	170,5	263,1	23,9	82,9
HT06	WRG aus Kälteanlage	MWh/a	426,4	210,1	298,7	531,8	70,1	107,5
HT07	Effizientere Heizung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT08	Pelletheizung	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT09	Luftwärmepumpe	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT10	Erdwärmepumpe	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT11	Drehzahlregelung Umwälzpumpe	MWh/a	1,1	1,6	0,0	0,4	0,0	0,0
BL01	Tageslicht Dimmen	MWh/a	39,5	6,1	11,7	23,6	4,3	2,7
BL02	Regeln nach Anwesenheit	MWh/a	41,1	17,5	33,2	16,9	0,0	7,6
BL03	Effizientere Beleuchtung	MWh/a	175,0	76,9	47,6	72,3	32,4	33,5

* Die Energieeffizienzmaßnahmen HZ08 bis HZ10 wurden im positiven Extremszenario aufgrund einer Konkurrenz zur Energieeffizienzmaßnahme HZ07 nicht gezogen.

WRG Wärmerückgewinnung

Tabelle C-7: Gewichtete spezifische Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
EM01	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	20,9	0,0	0,0	28,7	0,0
EM02	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	135,3	0,0	0,0	0,0
EM03	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	283,7	0,0	0,0	93,1	121,2	453,9
EM04	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	381,9	19,4	134,1	118,7	541,8	92,5
EM05	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	112,3	167,2	>1.000	>1.000	>1.000
EM06	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	995,4	414,7	969,7	293,6	>1.000
PU01	Dimensionierung Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	358,9	>1.000	0,0	0,0	>1.000	0,0
PU02	Beseitigung Leckagen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	439,9	>1.000	>1.000	514,2
PU03	Reduktion der Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	315,3	>1.000	>1.000	>1.000
PU04	Effizientere Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	0,0	0,0	>1.000	0,0
PU05	Wartung Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	>1.000	>1.000	>1.000	>1.000
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	14,8	0,0	0,0	70,9	0,0
PU07	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	37,6	0,0	651,1	24,8	70,2	0,0
PU08	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU09	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	45,4	15,5	319,1
PU10	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	157,5
PU11	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	231,1	>1.000	>1.000	>1.000	334,6	517,4
VT01	Reduktion der Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	504,0	0,0	0,0	0,0	247,1	165,1
VT02	Dimensionierung Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT03	Effizienterer Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	85,2	0,0	0,0	0,0	53,4	25,8
VT04	Wartung Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000	0,0	> 1.000
VT05	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	21,3	0,0	0,0	22,5	0,0
VT06	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT07	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	353,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT08	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT09	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	144,8	0,0	0,0	0,0	0,0
VT10	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	440,6	113,8	474,0	596,3	> 1.000	971,0
DL01	Beseitigung der Leckagen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL02	Druckniveaubasenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	57,1	0,0	80,0	0,0	229,8	0,0
DL03	Reduzieren Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	202,9	203,4	51,0	0,0	726,6	0,0
DL04	Dimensionierung Druckluftkomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL05	Effizientere Drucklufttrocknung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000
DL06	Effizienterer Druckluftkomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	127,0	0,0	0,0	0,0	445,0	0,0
DL07	Übergeordnete Steuerung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL08	Größerer Druckluftspeicher	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL09	Austausch der Ansaugfilter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL10	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL11	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL12	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	86,5	0,0	0,0	0,0	58,3	0,0
DL13	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL14	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	81,6	0,0	0,0	0,0	228,3	0,0
KM01	Dämmung der Kälteanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	163,2	0,0	0,0	312,4
KM02	Freie Kühlung (Winter)	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM03	Anheben Verdampfungstemp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48,8
KM04	Reinigung Wärmeübertrager	EUR ₂₀₁₅ /MWh	231,5	> 1.000	> 1.000	934,5	> 1.000	> 1.000

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
KM05	Kondensationstemp.-Regelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	82,4	0,0	0,0	0,0
KM06	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM07	Effizienterer Kältekompressor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	127,6	> 1.000	108,3	119,7
KM08	Drehzahlregelte Kältekomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM09	Dimensionierung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM10	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM11	Drehzahlregelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM12	Dimensionierung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM13	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	101,6	0,0	0,0	31,6	> 1.000
KM14	Drehzahlregelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT01	Dämmung Wände + Dach	EUR ₂₀₁₅ /MWh	> 1.000	478,5	752,9	765,8	> 1.000	> 1.000
HT02	Wärmedämmverglasung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	287,1	261,9	850,4	544,4	391,7	290,7
HT03	Temperaturabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT04	Wochenendabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT05	WRG aus Druckluftanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT06	WRG aus Kälteanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT07	Effizientere Heizung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	97,9	151,4	266,5	252,0	31,9	113,9
HT08	Pelletheizung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT09	Luftwärmepumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT10	Erdwärmepumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT11	Drehzahlregelung Umwälzpumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
BL01	Tageslicht Dimmen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	14,1	81,3	103,3	73,8	90,8	64,2
BL02	Regeln nach Anwesenheit	EUR ₂₀₁₅ /MWh	363,9	337,3	124,6	364,6	0,0	282,9
BL03	Effizientere Beleuchtung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	145,0	291,6	231,4	169,4	266,8	246,1

* Die Energieeffizienzmaßnahmen HZ08 bis HZ10 wurden im positiven Extremszenario aufgrund einer Konkurrenz zur Energieeffizienzmaßnahme HZ07 nicht gezogen.

WRG Wärmerückgewinnung

Tabelle C-8: Energieeinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
EM01	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,7	0,0	0,0	0,1	0,0
EM02	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0
EM03	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
EM04	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,5	1,3	15,9	0,6	0,6	11,2
EM05	Frequenzumrichter	MWh/a	1,1	12,4	13,1	0,0	0,1	0,2
EM06	Wartung Elektromotor	MWh/a	0,0	1,5	1,5	0,9	0,8	0,2
PU01	Dimensionierung Pumpe	MWh/a	1,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
PU02	Beseitigung Leckagen	MWh/a	0,6	0,1	0,4	0,2	0,0	0,1
PU03	Reduktion der Druckverluste	MWh/a	1,3	0,1	5,2	0,1	0,4	1,5
PU04	Effizientere Pumpe	MWh/a	1,7	0,5	0,0	0,0	0,4	0,0
PU05	Wartung Pumpe	MWh/a	0,9	0,0	1,7	1,0	0,5	1,7
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
PU07	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	3,1	0,0	5,8	10,9	0,3	0,0
PU08	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU09	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	1,4	0,3	11,6
PU10	Frequenzumrichter	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9
PU11	Wartung Elektromotor	MWh/a	4,6	0,1	0,5	0,0	1,4	0,9
VT01	Reduktion der Druckverluste	MWh/a	0,4	0,0	0,0	0,0	2,2	2,0
VT02	Dimensionierung Ventilator	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT03	Effizienterer Ventilator	MWh/a	1,3	0,0	0,0	0,0	2,5	7,2
VT04	Wartung Ventilator	MWh/a	1,3	2,9	0,7	1,1	0,0	0,4
VT05	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
VT06	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT07	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT08	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT09	Frequenzumrichter	MWh/a	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
VT10	Wartung Elektromotor	MWh/a	2,7	5,2	1,3	2,4	0,5	0,7
DL01	Beseitigung der Leckagen	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL02	Druckniveauabsenkung	MWh/a	2,1	0,0	4,2	0,0	0,4	0,0
DL03	Reduzieren Druckverluste	MWh/a	1,2	1,6	4,3	0,0	0,1	0,0
DL04	Dimensionierung Druckluftkomp.	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL05	Effizientere Drucklufttrocknung	MWh/a	0,2	0,3	1,1	1,4	0,0	0,1
DL06	Effizienterer Druckluftkompressor	MWh/a	12,3	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0
DL07	Übergeordnete Steuerung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL08	Größerer Druckluftspeicher	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL09	Austausch der Ansaugfilter	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL10	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL11	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL12	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	3,6	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0
DL13	Frequenzumrichter	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL14	Wartung Elektromotor	MWh/a	1,6	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0
KM01	Dämmung der Kälteanlage	MWh/a	0,0	0,0	3,8	0,0	0,0	1,1
KM02	Freie Kühlung (Winter)	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM03	Anheben Verdampfungstemp.	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
KM04	Reinigung Wärmeübertrager	MWh/a	2,8	0,5	1,3	4,8	0,1	0,7

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
KM05	Kondensationstemp.-Regelung	MWh/a	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
KM06	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM07	Effizienterer Kältekompressor	MWh/a	0,0	0,0	1,7	0,2	0,8	1,0
KM08	Drehzahlregelte Kältekomp.	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM09	Dimensionierung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM10	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM11	Drehzahlregelung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM12	Dimensionierung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM13	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	0,5	0,0	0,0	0,3	0,1
KM14	Drehzahlregelung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT01	Dämmung Wände + Dach	MWh/a	146,6	430,1	148,0	187,9	39,4	73,6
HT02	Wärmedämmverglasung	MWh/a	46,9	68,4	20,5	46,5	27,9	68,7
HT03	Temperaturabsenkung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT04	Wochenendabsenkung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT05	WRG aus Druckluftanlage	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT06	WRG aus Kälteanlage	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT07	Effizientere Heizung	MWh/a	427,6	423,2	104,4	202,6	146,1	102,6
HT08	Pelletheizung	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT09	Luftwärmepumpe	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT10	Erdwärmepumpe	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT11	Drehzahlregelung Umwälzpumpe	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
BL01	Tageslicht Dimmen	MWh/a	29,6	25,0	8,8	5,0	10,0	10,9
BL02	Regeln nach Anwesenheit	MWh/a	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
BL03	Effizientere Beleuchtung	MWh/a	44,7	22,8	11,7	18,6	8,6	10,1

* Die Energieeffizienzmaßnahmen HZ08 bis HZ10 wurden im positiven Extremszenario aufgrund einer Konkurrenz zur Energieeffizienzmaßnahme HZ07 nicht gezogen.

WRG Wärmerückgewinnung

Ergebnisse der integrierten Bewertung im negativen Extremszenario

Die Tabelle C-9 bis Tabelle C-12 zeigen die Ergebnisse der Potenzialanalyse für die kunststoffverarbeitende Industrie in Deutschland auf Ebene der sechs betrachteten Typbetriebe im negativen Extremszenario (s. Abschnitt 6.1). Gemäß den Ausführungen im Abschnitt 4.3 werden jeweils aller Energieeffizienzmaßnahmen eines Typs mit positiven bzw. negativen spezifischen Energieeinsparkosten aggregiert dargestellt. Die Tabelle C-9 und Tabelle C-10 zeigen die gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten respektive das Endenergieeinsparpotenzial der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten. In der Tabelle C-11 und Tabelle C-12 sind die gewichteten spezifischen Energieeinsparkosten respektive das Endenergieeinsparpotenzial der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten dokumentiert.

Tabelle C-9: Gewichtete spezifische Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
EM01	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EM02	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-45,4	-17,3	-45,8	-52,4	-32,1	0,0
EM03	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-88,7	-54,8	-47,0	-61,5	-44,3	0,0
EM04	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-29,1	-25,6	0,0	0,0	-12,5	0,0
EM05	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EM06	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-1,4	-5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU01	Dimensionierung Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-85,0	0,0	-40,5
PU02	Beseitigung Leckagen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-31,4	0,0	0,0
PU03	Reduktion der Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU04	Effizientere Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	-34,9	-97,7	-53,3	-34,3
PU05	Wartung Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU07	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-61,6	-7,9	-74,9	-53,5	-62,9	-14,5
PU08	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-53,0	-37,8	-35,3	-85,7	-41,7	-32,5
PU09	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU10	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-85,4	0,0	0,0	-12,5	-72,4	-0,4
PU11	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT01	Reduktion der Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT02	Dimensionierung Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT03	Effizienterer Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-26,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT04	Wartung Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT05	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT06	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-27,2	0,0	-16,0	0,0	-39,1
VT07	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-57,0	-75,1	-55,9	-53,3	-14,2	0,0
VT08	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-41,7	0,0	0,0	-32,5	-5,1	0,0
VT09	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-24,9	-78,2	-78,8	-29,4	-11,8	0,0
VT10	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL01	Beseitigung der Leckagen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-18,6	-47,9	-90,3	0,0	-51,0
DL02	Druckniveaubabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	-61,9	0,0	0,0

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
DL03	Reduzieren Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL04	Dimensionierung Druckluftkomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL05	Effizientere Drucklufttrocknung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL06	Effizienterer Druckluftkompressor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL07	Übergeordnete Steuerung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL08	Größerer Druckluftspeicher	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-50,0
DL09	Austausch der Ansaugfilter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	-56,8	0,0	0,0	-57,2
DL10	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL11	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-67,2	-84,5	-85,8	-98,0	-13,1	-71,3
DL12	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL13	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-48,3	0,0	-68,1	0,0	0,0
DL14	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-31,9	-69,0	-75,5	0,0	-6,6
KM01	Dämmung der Kälteanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-82,7	-58,8	-61,9	-38,8	-45,6	-77,4
KM02	Freie Kühlung (Winter)	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-97,8	-90,3	-92,8	-101,1	-89,4	-80,2
KM03	Anheben Verdampfungstemp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-50,0	0,0	-87,8	0,0	-32,2
KM04	Reinigung Wärmeübertrager	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM05	Kondensationstemp.-Regelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-86,2	0,0	-90,9	0,0	-48,4
KM06	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-20,0	-70,8	-99,2	0,0	-71,7
KM07	Effizienterer Kältekompressor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM08	Drehzahlgeregelte Kältekomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-20,2	-6,2	-87,7	-6,8	-48,8
KM09	Dimensionierung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-85,4	-103,6	-73,1	-77,3	0,0	-74,3
KM10	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-18,7	-95,3	-39,7	0,0	0,0
KM11	Drehzahlregelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-35,8	-45,6	-14,4	-46,6	0,0	-47,8
KM12	Dimensionierung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-35,4	0,0	0,0	0,0	0,0
KM13	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	-18,6	-19,6	0,0	0,0
KM14	Drehzahlregelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-78,4	-80,9	-93,4	0,0	-65,8
HT01	Dämmung Wände + Dach	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT02	Wärmedämmverglasung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT03	Temperaturabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-19,0	-13,6	-12,2	0,0	-18,4
HT04	Wochenendabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT05	WRG aus Druckluftanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-11,4	-13,4	-16,1	0,0	-5,4
HT06	WRG aus Kälteanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-3,4	0,0	0,0	-7,1	0,0	0,0
HT07	Effizientere Heizung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT08	Pelletheizung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT09	Luftwärmepumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT10	Erdwärmepumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT11	Drehzahlregelung Umwälzpumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	-0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
BL01	Tageslicht Dimmen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
BL02	Regeln nach Anwesenheit	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-3,6	0,0	-23,4	-7,1	0,0	0,0
BL03	Effizientere Beleuchtung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	-63,5	-42,7	-59,9	-64,6	-41,4	-39,1

* Die Energieeffizienzmaßnahmen HZ08 bis HZ10 wurden im negativen Extremszenario aufgrund einer Konkurrenz zur Energieeffizienzmaßnahme HZ07 nicht gezogen.

WRG Wärmerückgewinnung

Tabelle C-10: Energieeinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen mit negativen spezifischen Energieeinsparkosten

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
EM01	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EM02	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	8,5	70,6	75,0	90,0	4,3	0,0
EM03	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	4,9	5,4	9,0	3,6	0,6	0,0
EM04	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	29,6	9,6	0,0	0,0	2,9	0,0
EM05	Frequenzumrichter	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EM06	Wartung Elektromotor	MWh/a	1,5	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0
PU01	Dimensionierung Pumpe	MWh/a	0,0	0,0	0,0	8,1	0,0	4,5
PU02	Beseitigung Leckagen	MWh/a	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0	0,0
PU03	Reduktion der Druckverluste	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU04	Effizientere Pumpe	MWh/a	0,0	0,0	2,8	16,1	0,5	6,1
PU05	Wartung Pumpe	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU07	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	44,9	1,6	12,5	83,1	11,5	1,6
PU08	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	7,1	0,3	4,4	2,6	1,7	6,6
PU09	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PU10	Frequenzumrichter	MWh/a	328,3	0,0	0,0	19,2	37,2	0,9
PU11	Wartung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT01	Reduktion der Druckverluste	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT02	Dimensionierung Ventilator	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT03	Effizienterer Ventilator	MWh/a	0,0	107,8	0,0	0,0	0,0	0,0
VT04	Wartung Ventilator	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT05	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT06	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	16,1	0,0	10,4	0,0	21,9
VT07	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	4,9	17,0	2,3	2,7	0,5	0,0
VT08	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	5,3	0,0	0,0	14,3	0,6	0,0
VT09	Frequenzumrichter	MWh/a	28,3	75,4	50,3	21,5	13,3	0,0
VT10	Wartung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL01	Beseitigung der Leckagen	MWh/a	0,0	32,6	82,2	423,6	0,0	19,9
DL02	Druckniveauabsenkung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	55,0	0,0	0,0
DL03	Reduzieren Druckverluste	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL04	Dimensionierung Druckluftkomp.	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL05	Effizientere Drucklufttrocknung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL06	Effizienterer Druckluftkompressor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL07	Übergeordnete Steuerung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL08	Größerer Druckluftspeicher	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,9
DL09	Austausch der Ansaugfilter	MWh/a	0,0	0,0	4,6	0,0	0,0	1,2
DL10	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL11	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	5,1	9,3	18,0	46,0	0,9	3,1
DL12	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL13	Frequenzumrichter	MWh/a	0,0	17,1	0,0	23,5	0,0	0,0
DL14	Wartung Elektromotor	MWh/a	0,0	5,1	16,6	10,9	0,0	2,0
KM01	Dämmung der Kälteanlage	MWh/a	14,3	7,5	10,6	6,1	2,6	10,4
KM02	Freie Kühlung (Winter)	MWh/a	125,5	79,1	133,6	386,0	52,5	48,6
KM03	Anheben Verdampfungstemp.	MWh/a	0,0	3,9	0,0	14,4	0,0	3,5
KM04	Reinigung Wärmeübertrager	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
KM05	Kondensationstemp.-Regelung	MWh/a	0,0	10,7	0,0	21,8	0,0	4,6
KM06	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	0,9	4,0	15,6	0,0	1,6
KM07	Effizienterer Kältekompressor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM08	Drehzahlregelte Kältekomp.	MWh/a	0,0	9,6	6,7	107,5	3,6	32,4
KM09	Dimensionierung	MWh/a	4,1	27,1	3,7	1,7	0,0	4,2
KM10	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	1,0	6,3	1,9	0,0	0,0
KM11	Drehzahlregelung	MWh/a	1,8	2,5	1,9	4,0	0,0	1,8
KM12	Dimensionierung	MWh/a	0,0	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0
KM13	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,8	18,0	0,0	0,0
KM14	Drehzahlregelung	MWh/a	0,0	14,2	11,7	29,5	0,0	5,3
HT01	Dämmung Wände + Dach	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT02	Wärmedämmverglasung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT03	Temperaturabsenkung	MWh/a	0,0	42,3	14,1	14,1	0,0	22,8
HT04	Wochenendabsenkung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT05	WRG aus Druckluftanlage	MWh/a	0,0	158,7	162,5	251,5	0,0	83,4
HT06	WRG aus Kälteanlage	MWh/a	406,0	0,0	0,0	504,9	0,0	0,0
HT07	Effizientere Heizung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT08	Pelletheizung	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT09	Luftwärmepumpe	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT10	Erdwärmepumpe	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT11	Drehzahlregelung Umwälzpumpe	MWh/a	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
BL01	Tageslicht Dimmen	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
BL02	Regeln nach Anwesenheit	MWh/a	11,7	0,0	6,6	4,1	0,0	0,0
BL03	Effizientere Beleuchtung	MWh/a	100,8	45,2	30,4	41,5	15,4	19,8

* Die Energieeffizienzmaßnahmen HZ08 bis HZ10 wurden im negativen Extremszenario aufgrund einer Konkurrenz zur Energieeffizienzmaßnahme HZ07 nicht gezogen.

WRG Wärmerückgewinnung

Tabelle C-11: Gewichtete spezifische Energieeinsparkosten der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
EM01	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	208,9	238,2	0,0	294,9	0,0
EM02	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	257,4	42,6	39,3	0,0
EM03	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	494,5	67,3	47,3	126,7	166,2	64,7
EM04	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	35,6	92,1	301,4	122,2	192,0	202,0
EM05	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	413,9	495,9	239,5	>1.000	>1.000
EM06	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	373,1	558,7	599,0	>1.000	452,0	400,7
PU01	Dimensionierung Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	264,9	>1.000	102,8	0,0	378,7	0,0
PU02	Beseitigung Leckagen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	730,4	>1.000	>1.000	0,0
PU03	Reduktion der Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	745,8	182,6	>1.000	>1.000
PU04	Effizientere Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	0,0	0,0	>1.000	0,0
PU05	Wartung Pumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	>1.000	>1.000	>1.000	>1.000	>1.000	>1.000
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	291,0	527,0	0,0	377,3	0,0
PU07	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	206,9	740,6	>1.000	292,9	241,3	0,0
PU08	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	19,1	0,0	64,5	8,2	22,8	5,4
PU09	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	228,0	541,7	628,8
PU10	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	96,4	28,7	118,0	>1.000	104,5	221,5
PU11	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	429,2	>1.000	>1.000	244,9	497,8	710,2
VT01	Reduktion der Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	160,4	88,5	238,4	149,9	625,9	460,9
VT02	Dimensionierung Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	> 1.000	90,0	77,2	137,7	245,5	> 1.000
VT03	Effizienterer Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	98,1	142,0	161,9	53,4	390,4	263,0
VT04	Wartung Ventilator	EUR ₂₀₁₅ /MWh	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000	0,0	> 1.000
VT05	Zeitgesteuerte Abschaltung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	303,6	0,0	10,4	282,8	0,0
VT06	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT07	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	164,5	0,0	0,0	47,2	205,5	24,0
VT08	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	59,7	40,5	35,5	0,0	139,3	0,0
VT09	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	23,2	0,0	0,0	0,0	0,0	35,3
VT10	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	631,0	214,9	664,5	811,8	> 1.000	> 1.000
DL01	Beseitigung der Leckagen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	50,2	0,0	0,0	0,0	61,2	0,0
DL02	Druckniveaubasenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	627,9	226,1	356,8	0,0	881,4	121,8
DL03	Reduzieren Druckverluste	EUR ₂₀₁₅ /MWh	715,1	376,4	325,1	0,0	> 1.000	215,7
DL04	Dimensionierung Druckluftkomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL05	Effizientere Drucklufttrocknung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000
DL06	Effizienterer Druckluftkomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	> 1.000	267,8	115,9	8,0	> 1.000	0,0
DL07	Übergeordnete Steuerung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	163,8
DL08	Größerer Druckluftspeicher	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	53,6	0,0	0,0	9,9	0,0
DL09	Austausch der Ansaugfilter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	93,7	57,6	0,0	0,0	0,0	0,0
DL10	Dimensionierung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL11	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL12	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	954,7	507,2	175,3	97,7	851,2	0,0
DL13	Frequenzumrichter	EUR ₂₀₁₅ /MWh	144,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL14	Wartung Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	209,9	0,0	0,0	0,0	582,5	0,0
KM01	Dämmung der Kälteanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	547,5	28,8	0,0	685,9
KM02	Freie Kühlung (Winter)	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM03	Anheben Verdampfungstemp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	93,3	23,4	0,0	318,7
KM04	Reinigung Wärmeübertrager	EUR ₂₀₁₅ /MWh	768,9	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
KM05	Kondensationstemp.-Regelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	428,1	227,5	0,0	0,0
KM06	Effizientere Kraftübertragung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9	0,0
KM07	Effizienterer Kältekompressor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	366,7	> 1.000	348,1
KM08	Drehzahlregelte Kältekomp.	EUR ₂₀₁₅ /MWh	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM09	Dimensionierung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	156,7
KM10	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	320,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM11	Drehzahlregelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	62,9	0,0
KM12	Dimensionierung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	231,4	81,0	52,6	0,0
KM13	Effizienterer Elektromotor	EUR ₂₀₁₅ /MWh	33,7	460,4	95,0	142,7	380,7	261,5
KM14	Drehzahlregelung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	0,0
HT01	Dämmung Wände + Dach	EUR ₂₀₁₅ /MWh	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000	> 1.000
HT02	Wärmedämmverglasung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	697,2	666,4	> 1.000	> 1.000	941,8	716,9
HT03	Temperaturabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT04	Wochenendabsenkung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT05	WRG aus Druckluftanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	0,0	0,0	0,0	27,7	0,0
HT06	WRG aus Kälteanlage	EUR ₂₀₁₅ /MWh	0,0	18,9	4,3	0,0	69,3	39,3
HT07	Effizientere Heizung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	300,2	388,7	651,0	644,4	245,3	447,4
HT08	Pelletheizung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT09	Luftwärmepumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT10	Erdwärmepumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	*	*	*	*	*	*
HT11	Drehzahlregelung Umwälzpumpe	EUR ₂₀₁₅ /MWh	17,7	0,0	0,0	595,6	0,0	0,0
BL01	Tageslicht Dimmen	EUR ₂₀₁₅ /MWh	192,7	352,3	222,9	217,0	332,3	300,0
BL02	Regeln nach Anwesenheit	EUR ₂₀₁₅ /MWh	225,2	123,7	126,9	179,5	0,0	105,0
BL03	Effizientere Beleuchtung	EUR ₂₀₁₅ /MWh	317,0	544,3	449,1	354,8	477,3	472,0

* Die Energieeffizienzmaßnahmen HZ08 bis HZ10 wurden im negativen Extremszenario aufgrund einer Konkurrenz zur Energieeffizienzmaßnahme HZ07 nicht gezogen.

WRG Wärmerückgewinnung

Tabelle C-12: Energieeinsparungen der Energieeffizienzmaßnahmen mit positiven spezifischen Energieeinsparkosten

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
EM01	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	1,2	0,6	0,0	0,1	0,0
EM02	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	6,4	0,2	0,3	0,0
EM03	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	1,0	0,1	0,3	0,2	1,8
EM04	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	24,3	46,6	39,9	12,0	5,4	30,2
EM05	Frequenzumrichter	MWh/a	1,0	11,1	13,1	4,9	0,0	0,2
EM06	Wartung Elektromotor	MWh/a	1,1	3,7	1,5	0,9	0,8	1,9
PU01	Dimensionierung Pumpe	MWh/a	11,3	0,3	3,3	0,0	0,8	0,0
PU02	Beseitigung Leckagen	MWh/a	0,4	0,1	0,4	0,2	0,0	0,0
PU03	Reduktion der Druckverluste	MWh/a	0,7	0,1	5,2	6,5	0,3	1,6
PU04	Effizientere Pumpe	MWh/a	1,5	0,4	0,0	0,0	0,6	0,0
PU05	Wartung Pumpe	MWh/a	0,9	0,0	1,7	1,0	0,5	1,7
PU06	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
PU07	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	11,8	0,1	5,9	13,4	3,0	0,0
PU08	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,1	0,0	0,1	0,0	0,3	0,6
PU09	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	6,4	1,1	16,2
PU10	Frequenzumrichter	MWh/a	2,7	2,5	3,4	0,3	2,0	5,3
PU11	Wartung Elektromotor	MWh/a	4,2	0,1	0,5	0,8	1,4	0,9
VT01	Reduktion der Druckverluste	MWh/a	8,6	16,6	4,4	6,4	2,5	2,3
VT02	Dimensionierung Ventilator	MWh/a	0,1	36,6	22,9	3,0	9,2	0,1
VT03	Effizienterer Ventilator	MWh/a	52,0	30,4	12,4	45,9	2,3	15,3
VT04	Wartung Ventilator	MWh/a	1,4	3,0	0,7	1,1	0,0	0,4
VT05	Zeitgesteuerte Abschaltung	MWh/a	0,0	0,3	0,0	0,2	0,0	0,0
VT06	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VT07	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,3	0,0	0,0	0,4	0,0	1,2
VT08	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	20,3	33,8	4,9	0,0	1,0	0,0
VT09	Frequenzumrichter	MWh/a	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8
VT10	Wartung Elektromotor	MWh/a	2,7	6,7	1,3	2,5	0,5	0,7
DL01	Beseitigung der Leckagen	MWh/a	13,9	0,0	0,0	0,0	3,8	0,0
DL02	Druckniveauabsenkung	MWh/a	1,4	4,1	4,7	0,0	0,3	1,9
DL03	Reduzieren Druckverluste	MWh/a	1,1	2,6	4,6	0,0	0,2	1,2
DL04	Dimensionierung Druckluftkomp.	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL05	Effizientere Drucklufttrocknung	MWh/a	0,2	0,3	1,1	1,4	0,0	0,1
DL06	Effizienterer Druckluftkompressor	MWh/a	4,7	16,4	45,2	85,2	1,3	0,0
DL07	Übergeordnete Steuerung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,9
DL08	Größerer Druckluftspeicher	MWh/a	0,0	5,4	0,0	0,0	1,2	0,0
DL09	Austausch der Ansaugfilter	MWh/a	0,6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
DL10	Dimensionierung Elektromotor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL11	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL12	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	1,8	3,7	12,7	19,9	0,7	0,0
DL13	Frequenzumrichter	MWh/a	7,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DL14	Wartung Elektromotor	MWh/a	1,6	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0
KM01	Dämmung der Kälteanlage	MWh/a	0,0	0,0	4,0	31,9	0,0	1,4
KM02	Freie Kühlung (Winter)	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM03	Anheben Verdampfungstemp.	MWh/a	0,0	0,0	2,5	1,4	0,0	0,8
KM04	Reinigung Wärmeübertrager	MWh/a	1,4	0,5	1,2	4,6	0,1	0,9

Nr.	Maßnahme	Einheit	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
KM05	Kondensationstemp.-Regelung	MWh/a	0,0	0,0	0,3	1,1	0,0	0,0
KM06	Effizientere Kraftübertragung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
KM07	Effizienterer Kältekompressor	MWh/a	0,0	0,0	0,0	3,8	0,2	1,0
KM08	Drehzahlregelte Kältekomp.	MWh/a	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM09	Dimensionierung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
KM10	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KM11	Drehzahlregelung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
KM12	Dimensionierung	MWh/a	0,0	0,0	2,0	13,1	3,9	0,0
KM13	Effizienterer Elektromotor	MWh/a	2,7	0,5	3,9	1,0	0,2	1,4
KM14	Drehzahlregelung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0
HT01	Dämmung Wände + Dach	MWh/a	147,2	445,8	152,5	184,1	37,9	74,4
HT02	Wärmedämmverglasung	MWh/a	47,2	66,4	20,4	45,8	27,6	68,6
HT03	Temperaturabsenkung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT04	Wochenendabsenkung	MWh/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HT05	WRG aus Druckluftanlage	MWh/a	74,1	0,0	0,0	0,0	26,9	0,0
HT06	WRG aus Kälteanlage	MWh/a	0,0	200,9	259,4	0,0	59,2	97,5
HT07	Effizientere Heizung	MWh/a	222,4	231,9	62,5	107,7	63,3	50,1
HT08	Pelletheizung	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT09	Luftwärmepumpe	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT10	Erdwärmepumpe	MWh/a	*	*	*	*	*	*
HT11	Drehzahlregelung Umwälzpumpe	MWh/a	0,8	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
BL01	Tageslicht Dimmen	MWh/a	65,1	29,2	23,0	26,9	13,9	12,8
BL02	Regeln nach Anwesenheit	MWh/a	3,1	6,7	14,2	2,1	0,0	2,9
BL03	Effizientere Beleuchtung	MWh/a	118,2	53,1	28,4	48,9	21,1	23,2

* Die Energieeffizienzmaßnahmen HZ08 bis HZ10 wurden im negativen Extremszenario aufgrund einer Konkurrenz zur Energieeffizienzmaßnahme HZ07 nicht gezogen.

WRG Wärmerückgewinnung

Sensitivitätsanalyse der Typbetriebe

Die Abbildung C-8 bis Abbildung C-13 zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (s. Abschnitt 6.4) für die sechs Typbetriebe der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland.

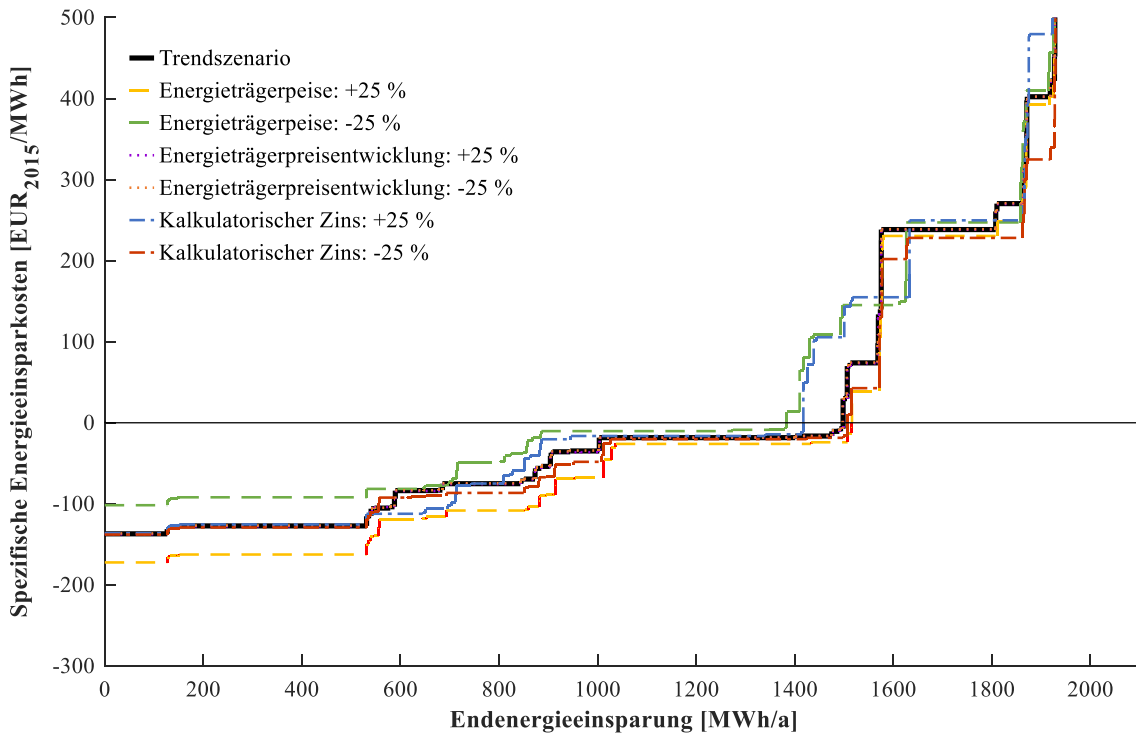


Abbildung C-8: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 1 zur Herstellung von Rohren

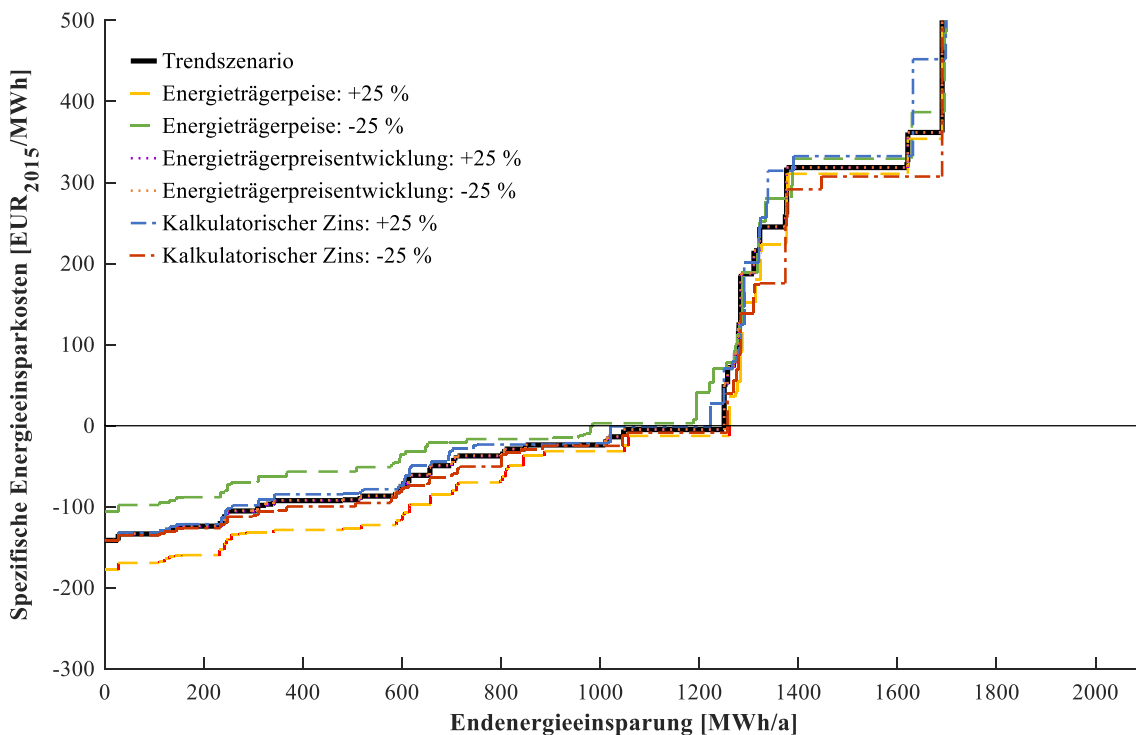


Abbildung C-9: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 2 zur Herstellung von Folien

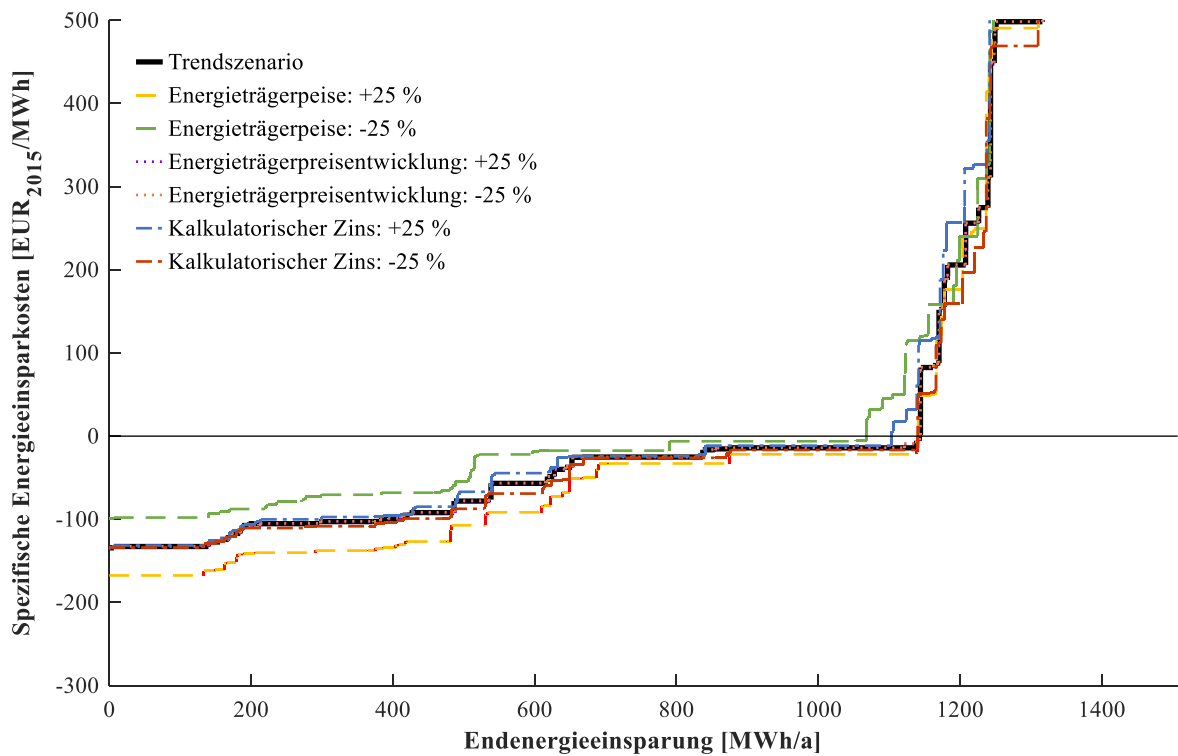


Abbildung C-10: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 3 zur Herstellung von Verpackungen

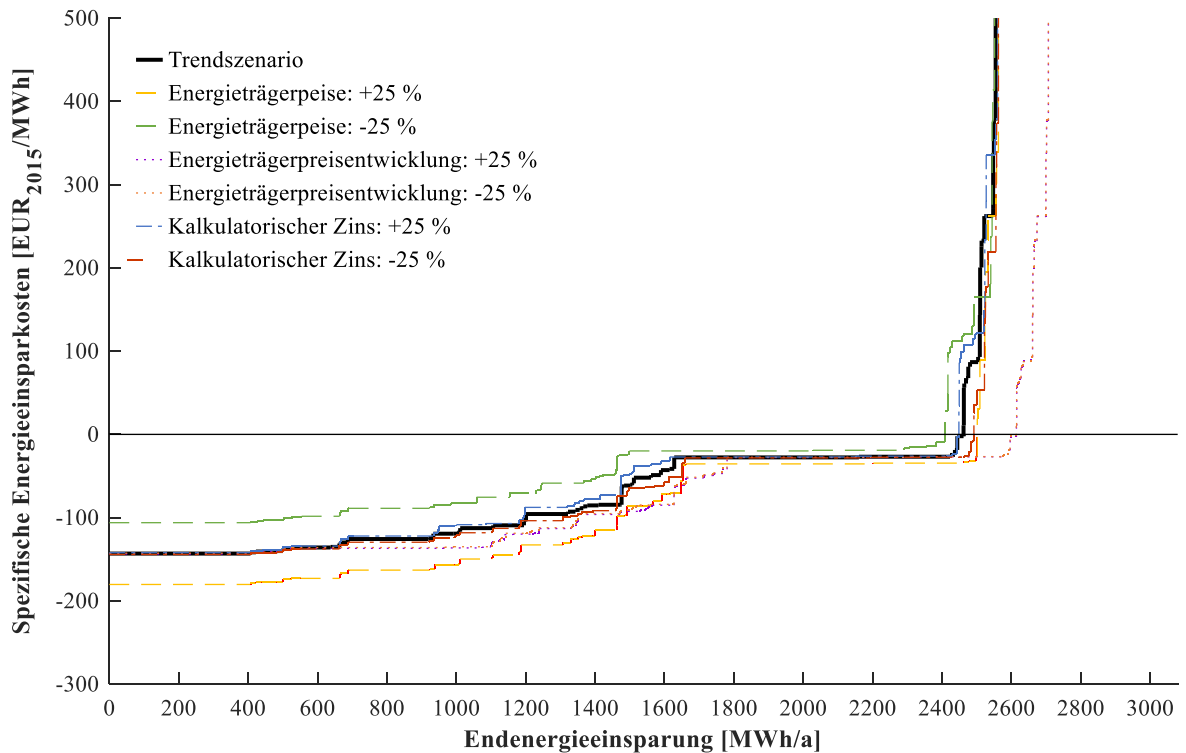


Abbildung C-11: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 4 zur Herstellung von Flaschen

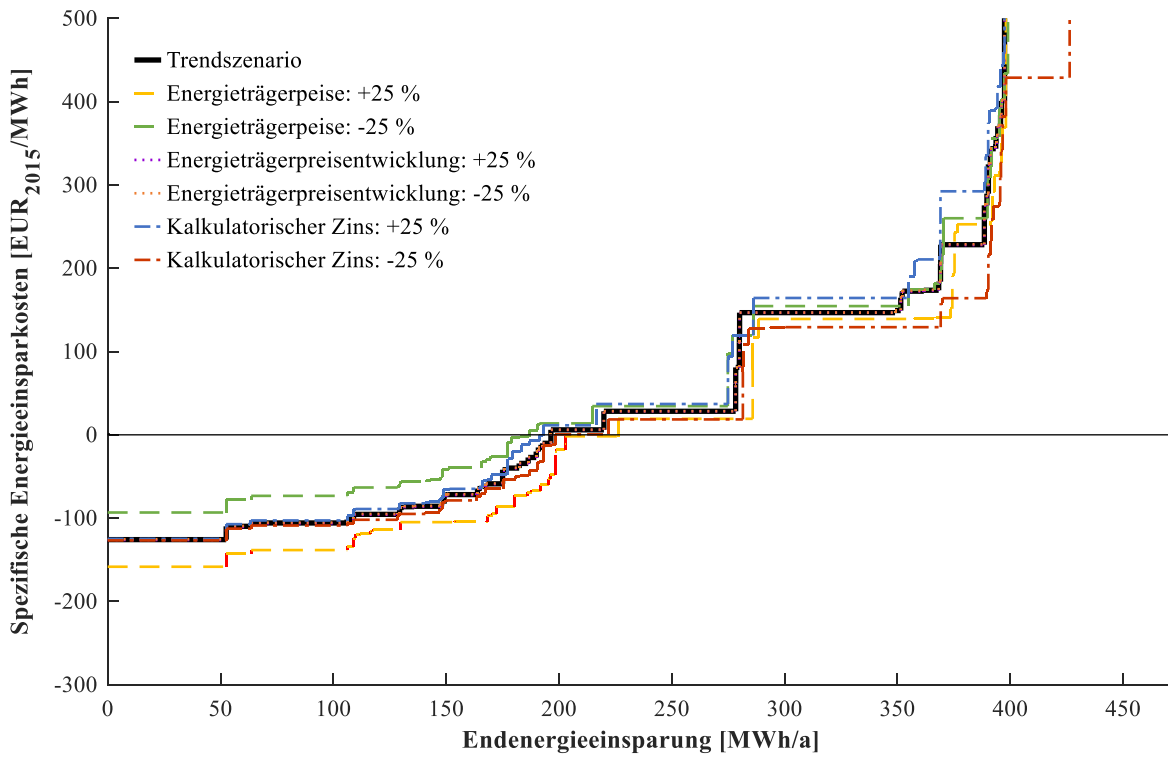


Abbildung C-12: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 5 zur Herstellung von Baubedarf

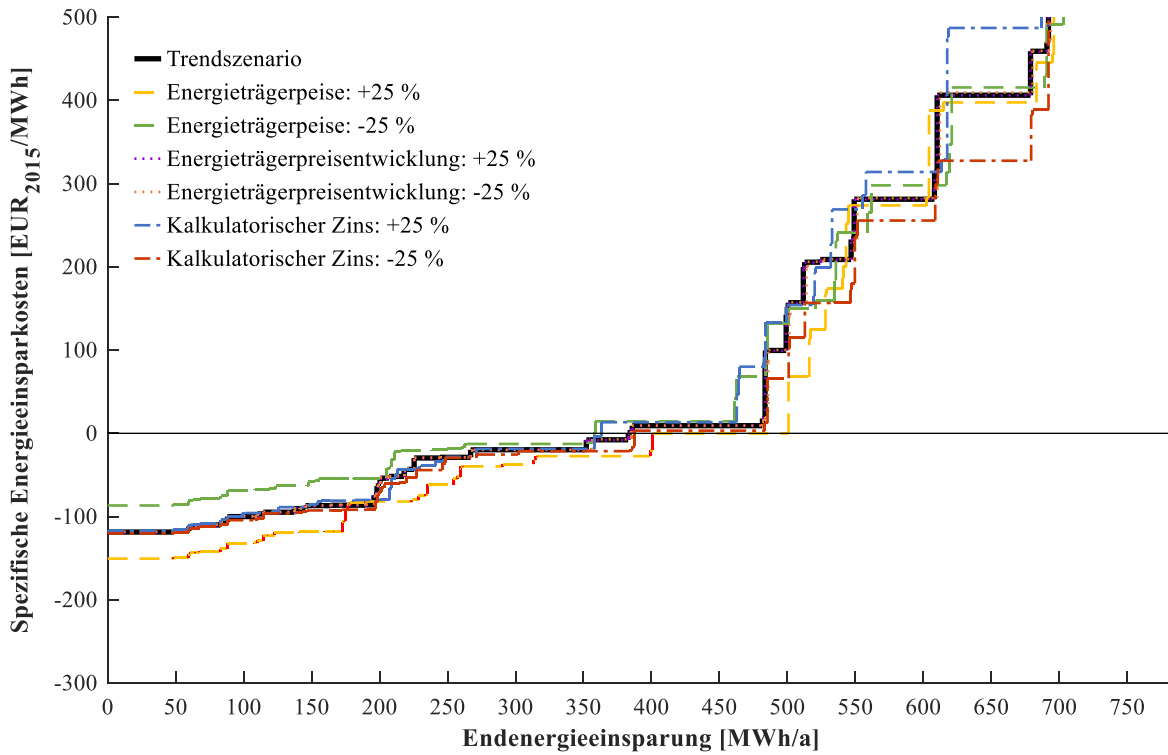


Abbildung C-13: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Typbetrieb 6 zur Herstellung von technischen Teilen

Forschungsberichte des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Bezugsadresse: Universität Stuttgart
 Institut für Energiewirtschaft
 und Rationelle Energieanwendung
 - Bibliothek -

 Tel.: 0711 / 685 87861
 Fax: 0711 / 685 87873
 E-Mail: bib@ier.uni-stuttgart.de

Bestellungen sind auch über Internet möglich:

<http://www.ier.uni-stuttgart.de>

- Band 141 R. Flatau
Integrierte Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen – Eine modellgestützte Analyse am Beispiel von Querschnittstechnologien
Juli 2019, 216 Seiten
- Band 140 B. Fleischer
Systemeffekte von Bioenergie in der Elektrizitäts- und Fernwärmewirtschaft – Eine modellgestützte Analyse langfristiger Energiewendeszenarien für Deutschland
April 2019, 190 Seiten
- Band 139 B. Mousavi
Analysis of the relative roles of supply-side and demand-side measures in tackling global climate change – Application of a hybrid energy system model
Januar 2019, 167 Seiten
- Band 138 S. Bothor
Prognose von Netzverlusten
August 2019, 152 Seiten
- Band 137 C. Schieberle
Development of a stochastic optimization approach to determine costefficient environmental protection strategies: Case study of policies for the future European passenger transport sector with a focus on railbound and on-road activities
Mai 2019, 218 Seiten
- Band 136 J. Welsch
Modellierung von energiespeichern und Power-to-X im deutschen und europäischen Energiesystem
Dezember 2018, 158 Seiten

- Band 135 E. M. Stenull
Stand und Entwicklungspotenziale der landwirtschaftlichen Biogasnutzung in Baden-Württemberg – ein regionalspezifischer Vergleich
Juni 2017, 171 Seiten
- Band 134 J.-C. Brunke
Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland - Eine Analyse mit Hilfe von Energieeinsparkostenkurven
August 2017, 353 Seiten
- Band 133 S. Wolf
Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme – Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung
Juni 2017, 177 Seiten
- Band 132 S. Marathe
Recognising the Change in Land Use Patterns and its Impacts on Energy Demand and Emissions in Gauteng, South Africa
April 2017, 202 Seiten
- Band 131 T. Haasz
Entwicklung von Methoden zur Abbildung von Demand Side Management in einem optimierenden Energiesystemmodell – Fallbeispiele für Deutschland in den Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Haushalte
April 2017, 177 Seiten
- Band 130 M. Steurer
Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung
April 2017, 230 Seiten
- Band 129 S. Bubeck
Potenziale elektrischer Energieanwendungstechniken zur rationellen Energieanwendung
Januar 2017, 255 Seiten
- Band 128 R. Beestermöller
Die Energienachfrage privater Haushalte und ihre Bedeutung für den Klimaschutz – Volkswirtschaftliche Analysen zur deutschen und europäischen Klimapolitik mit einem technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodell
Januar 2017, 211 Seiten
- Band 127 M. Ohl
Analyse der Einsatzpotenziale von Wärmeerzeugungstechniken in industriellen Anwendungen
August 2016, 202 Seiten

- Band 126 W. Genius
Grüne Bilanzierung - Internalisierung von Umwelt- und Gesundheitsschäden im Rahmen der Input-Output-Rechnung
April 2015, 243 Seiten
- Band 125 E. Heyden
Kostenoptimale Abwärmerückgewinnung durch integriert-iteratives Systemdesign (KOARiiS) - Ein Verfahren zur energetisch-ökonomischen Bewertung industrieller Abwärmepotenziale
2016, 121 Seiten
- Band 124 K. Ohlau
Strategien zur wirksamen Minderung von Fluglärm in Deutschland - Minderungsmaßnahmen und langfristige Perspektiven
2015, 192 Seiten
- Band 123 T. Telsnig
Standortabhängige Analyse und Bewertung solarthermischer Kraftwerke am Beispiel Südafrikas
September 2015, 285 Seiten
- Band 122 M. Henßler
Ganzheitliche Analyse thermochemischer Verfahren bei der Nutzung fester Biomasse zur Kraftstoffproduktion in Deutschland
April 2015, 243 Seiten
- Band 121 B. Fais
Modelling policy instruments in energy system models - the example of renewable electricity generation in Germany
Januar 2015, 194 Seiten
- Band 120 M. Blesl
Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas – eine Energiesystem- und Technikanalyse
August 2014, 204 Seiten
- Band 119 S. Kempe
Räumlich detaillierte Potenzialanalyse der Fernwärmeversorgung in Deutschland mit einem hoch aufgelösten Energiesystemmodell
Juli 2014, 204 Seiten
- Band 118 B. Thiruchittampalam
Entwicklung und Anwendung von Methoden und Modellen zur Berechnung von räumlich und zeitlich hochaufgelösten Emissionen in Europa
April 2014, 238 Seiten

- Band 117 T. Kober
Energiewirtschaftliche Anforderungen an neue fossil befeuerte Kraftwerkemit CO₂-Abscheidung im liberalisierten europäischen Elektrizitätsmarkt
März 2014, 158 Seiten
- Band 116 S. Wissel
Ganzheitlich-integrierte Betrachtung der Kernenergie im Hinblick auf eine nachhaltige Energieversorgung
Februar 2014, 230 Seiten
- Band 115 R. Kuder
Energieeffizienz in der Industrie – Modellgestützte Analyse des effizienten Energieeinsatzes in der EU-27 mit Fokus auf den Industriesektor
Februar 2014, 286 Seiten
- Band 114 J. Tomaschek
Long-term optimization of the transport sector to address greenhouse gas reduction targets under rapid growth – Application of an energy system model for Gauteng province, South Africa
Dezember 2013, 263 Seiten
- Band 114 B. Rühle
Kosten regionaler Energie- und Klimapolitik - Szenarioanalysen mit einem Energiesystemmodell auf Bundesländerebene
November 2013, 196 Seiten
- Band 112 N. Sun
Modellgestützte Untersuchung des Elektrizitätsmarktes - Kraftwerkseinsatzplanung und -investitionen
August 2013, 173 Seiten
- Band 111 J. Lambauer
Auswirkungen von Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft und die Energienachfrage in Deutschland - Am Beispiel der Nano und Biotechnologie
März 2013, 303 Seiten
- Band 110 R. Barth
Ökonomische und technisch-betriebliche Auswirkungen verteilter Elektrizitätserzeugung in Verteilungsnetzen - eine modellgestützte Analyse am Beispiel eines Mittelspannungsnetzes
März 2013, 234 Seiten
- Band 109 D. Bruchof
Energiewirtschaftliche Verkehrsstrategie - Möglichkeiten und Grenzen alternativer Kraftstoffe und Antriebe in Deutschland und der EU-27
März 2012, 226 Seiten

- Band 108 E. D. Özdemir
The Future Role of Alternative Powertrains and Fuels in the German Transport Sector - A model based scenario analysis with respect to technical, economic and environmental aspects with a focus on road transport
Januar 2012, 194 Seiten
- Band 107 U. Kugler
Straßenverkehrsemissionen in Europa - Emissionsberechnung und Bewertung von Minderungsmaßnahmen
Januar 2012, 236 Seiten
- Band 106 M. Blesl, D. Bruchof, U. Fahl, T. Kober, R. Kuder, B. Götz, A. Voß
Integrierte Szenarioanalysen zu Energie- und Klimaschutzstrategien in Deutschland in einem Post-Kyoto-Regime
Februar 2011, 200 Seiten
- Band 105 O. Mayer-Spohn
Parametrised Life Cycle Assessment of Electricity Generation in Hard-Coal-Fuelled Power Plants with Carbon Capture and Storage
Dezember 2009, 210 Seiten
- Band 104 A. König
Ganzheitliche Analyse und Bewertung konkurrierender energetischer Nutzungspfade für Biomasse im Energiesystem Deutschland bis zum Jahr 2030
Juli 2009, 194 Seiten
- Band 103 C. Kruck
Integration einer Stromerzeugung aus Windenergie und Speichersystemen unter besonderer Berücksichtigung von Druckluft-Speicherkraftwerken
Mai 2008, 162 Seiten
- Band 102 U. Fahl, B. Rühle, M. Blesl, I. Ellersdorfer, L. Eltrop, D.-C. Harlinghausen, R. Küster, T. Rehrl, U. Remme, A. Voß
Energieprognose Bayern 2030
Oktober 2007, 296 Seiten
- Band 101 U. Remme, M. Blesl, U. Fahl
Global resources and energy trade: An overview for coal, natural gas, oil and uranium
Juli 2007, 108 Seiten
- Band 100 S. Eckardt
Energie- und Umweltmanagement in Hotels und Gaststätten: Entwicklung eines Softwaretools zur systematischen Prozessanalyse und Management-unterstützung
Mai 2007, 152 Seiten

- Band 99 U. Remme
Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell
August 2006, 336 Seiten
- Band 98 L. Eltrop, J. Moerschner, M. Härdtlein, A. König
Bilanz und Perspektiven der Holzenergienutzung in Baden-Württemberg
Mai 2006, 102 Seiten
- Band 97 B. Frey
Modellierung systemübergreifender Energie- und Kohlenstoffbilanzen in Entwicklungsländern
Mai 2006, 148 Seiten
- Band 96 K. Sander
Potenziale und Perspektiven stationärer Brennstoffzellen
Juni 2004, 256 Seiten
- Band 95 M. A. dos Santos Bernardes
Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken
März 2004, 228 Seiten
- Band 94 J. Bagemihl
Optimierung eines Portfolios mit hydro-thermischem Kraftwerkspark im börslichen Strom- und Gasterminmarkt
Februar 2003, 138 Seiten
- Band 93 A. Stuiblé
Ein Verfahren zur graphentheoretischen Dekomposition und algebraischen Reduktion von komplexen Energiesystemmodellen
November 2002, 156 Seiten
- Band 92 M. Blesl
Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs
August 2002, 282 Seiten
- Band 91 S. Briem, M. Blesl, M. A. dos Santos Bernardes, U. Fahl, W. Krewitt, M. Nill, S. Rath-Nagel, A. Voß
Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg
August 2002, 138 Seiten
- Band 90 B. Frey, M. Neubauer
Energy Supply for Three Cities in Southern Africa
Juli 2002, 96 Seiten

- Band 89 A. Heinz, R. Hartmann, G. Hitzler, G. Baumbach
Wissenschaftliche Begleitung der Betriebsphase der mit Rapsölmethylester befeuerten Energieversorgungsanlage des Deutschen Bundestages in Berlin
Juli 2002, 212 Seiten
- Band 88 M. Sawillion
Aufbereitung der Energiebedarfsdaten und Einsatzanalysen zur Auslegung von Blockheizkraftwerken
Juli 2002, 136 Seiten
- Band 87 T. Marheineke
Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken
Juli 2002, 222 Seiten
- Band 86 B. Leven, C. Hoeck, C. Schaefer, C. Weber, A. Voß
Innovationen und Energiebedarf - Analyse ausgewählter Technologien und Branchen mit dem Schwerpunkt Stromnachfrage
Juni 2002, 224 Seiten
- Band 85 E. Laege
Entwicklung des Energiesektors im Spannungsfeld von Klimaschutz und Ökonomie - Eine modellgestützte Systemanalyse
Januar 2002, 254 Seiten
- Band 84 S. Molt
Entwicklung eines Instrumentes zur Lösung großer energiesystemanalytischer Optimierungsprobleme durch Dekomposition und verteilte Berechnung
Oktober 2001, 166 Seiten
- Band 83 D. Hartmann
Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien
September 2001, 228 Seiten
- Band 82 G. Kühner
Ein kosteneffizientes Verfahren für die entscheidungsunterstützende Umweltanalyse von Betrieben
September 2001, 210 Seiten
- Band 81 I. Ellersdorfer, H. Specht, U. Fahl, A. Voß
Wettbewerb und Energieversorgungsstrukturen der Zukunft
August 2001, 172 Seiten
- Band 80 B. Leven, J. Neubarth, C. Weber
Ökonomische und ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen
Mai 2001, 166 Seiten

- Band 79 R. Krüger, U. Fahl, J. Bagemihl, D. Herrmann
Perspektiven von Wasserstoff als Kraftstoff im öffentlichen Straßenpersonenverkehr von Ballungsgebieten und von Baden-Württemberg
 April 2001, 142 Seiten
- Band 78 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)
Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Europe
 Februar 2001, 248 Seiten
- Band 77 W. Rüdfler
Integrierte Ressourcenplanung für Baden-Württemberg
 Januar 2001, 284 Seiten
- Band 76 S. Rivas
Ein agro-ökologisches regionalisiertes Modell zur Analyse des Brennholzversorgungssystems in Entwicklungsländern
 Januar 2001, 200 Seiten
- Band 75 M. Härdtlein
Ansatz zur Operationalisierung ökologischer Aspekte von "Nachhaltigkeit" am Beispiel der Produktion und Nutzung von Triticale (*×Triticosecale* Wittmack)-Ganzpflanzen unter besonderer Berücksichtigung der luftgetragenen N-Freisetzungen
 September 2000, 168 Seiten
- Band 74 T. Marheineke, W. Krewitt, J. Neubarth, R. Friedrich, A. Voß
Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken
 August 2000, 118 Seiten
- Band 73 J. Sontow
Energiewirtschaftliche Analyse einer großtechnischen Windstromerzeugung
 Juli 2000, 242 Seiten
- Band 72 H. Hermes
Analysen zur Umsetzung rationeller Energieanwendung in kleinen und mittleren Unternehmen des Kleinverbrauchersektors
 Juli 2000, 188 Seiten
- Band 71 C. Schaefer, C. Weber, H. Voss-Uhlenbrock, A. Schuler, F. Oosterhuis, E. Nieuwlaar, R. Angioletti, E. Kjellsson, S. Leth-Petersen, M. Togeby, J. Munksgaard
Effective Policy Instruments for Energy Efficiency in Residential Space Heating - an International Empirical Analysis (EPISODE)
 Juni 2000, 146 Seiten
- Band 70 U. Fahl, J. Baur, I. Ellersdorfer, D. Herrmann, C. Hoeck, U. Remme, H. Specht, T. Steidle, A. Stuible, A. Voß
Energieverbrauchsprognose für Bayern
 Mai 2000, 240 Seiten

- Band 69 J. Baur
Verfahren zur Bestimmung optimaler Versorgungsstrukturen für die Elektrifizierung ländlicher Gebiete in Entwicklungsländern
Mai 2000, 154 Seiten
- Band 68 G. Weinrebe
Technische, ökologische und ökonomische Analyse von solarthermischen Turmkraftwerken
April 2000, 212 Seiten
- Band 67 C.-O. Wene, A. Voß, T. Fried (eds.)
Experience Curves for Policy Making - The Case of Energy Technologies
April 2000, 282 Seiten
- Band 66 A. Schuler
Entwicklung eines Modells zur Analyse des Endenergieeinsatzes in Baden-Württemberg
März 2000, 236 Seiten
- Band 65 A. Schäfer
Reduction of CO₂-Emissions in the Global Transportation Sector
März 2000, 290 Seiten
- Band 64 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)
Biogenic Emissions of Greenhouse Gases Caused by Arable and Animal Agriculture - Processes, Inventories, Mitigation
März 2000, 148 Seiten
- Band 63 A. Heinz, R. Stülpnagel, M. Kaltschmitt, K. Scheffer, D. Jezierska
Feucht- und Trockengutlinien zur Energiegewinnung aus biogenen Festbrennstoffen. Vergleich anhand von Energie- und Emissionsbilanzen sowie anhand der Kosten
Dezember 1999, 308 Seiten
- Band 62 U. Fahl, M. Blesl, D. Herrmann, C. Kemfert, U. Remme, H. Specht, A. Voß
Bedeutung der Kernenergie für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg - Auswirkungen eines Kernenergieausstiegs
November 1999, 146 Seiten
- Band 61 A. Greßmann, M. Sawillion, W. Krewitt, R. Friedrich
Vergleich der externen Effekte von KWK-Anlagen mit Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme
September 1999, 138 Seiten
- Band 60 R. Lux
Auswirkungen fluktuierender Einspeisung auf die Stromerzeugung konventioneller Kraftwerkssysteme
September 1999, 162 Seiten

- Band 59 M. Kayser
Energetische Nutzung hydrothormaler Erdwärmevorkommen in Deutschland - Eine energiewirtschaftliche Analyse -
Juli 1999, 184 Seiten
- Band 58 C. John
Emissionen von Luftverunreinigungen aus dem Straßenverkehr in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung - Untersuchung von Emissions-szenarien am Beispiel Baden-Württembergs
Juni 1999, 214 Seiten
- Band 57 T. Stelzer
Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen - Lebensweg-analysen von Umweltwirkungen
Mai 1999, 212 Seiten
- Band 56 R. Lux, J. Sontow, A. Voß
Systemtechnische Analyse der Auswirkungen einer windtechnischen Stromerzeugung auf den konventionellen Kraftwerkspark
Mai 1999, 322 Seiten
- Band 55 B. Biffar
Messung und Synthese von Wärmelastgängen in der Energieanalyse
Mai 1999, 236 Seiten
- Band 54 E. Fleißner
Statistische Methoden der Energiebedarfsanalyse im Kleinverbraucher-sektor
Januar 1999, 306 Seiten
- Band 53 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (Hrsg.)
Approaches to Greenhouse Gas Inventories of Biogenic Sources in Agriculture
Januar 1999, 252 Seiten
- Band 52 J. Haug, B. Gebhardt, C. Weber, M. van Wees, U. Fahl, J. Adnot, L. Cauret, A. Pierru, F. Lantz, J.-W. Bode, J. Vis, A. van Wijk, D. Staniaszek, Z. Zavody
Evaluation and Comparison of Utility's and Governmental DSM-Pro-grammes for the Promotion of Condensing Boilers
Oktober 1998, 156 Seiten
- Band 51 M. Blesl, A. Schweiker, C. Schlenzig
Erweiterung der Analysemöglichkeiten von NetWork - Der Netzwerkeditor
September 1998, 112 Seiten
- Band 50 S. Becher
Biogene Festbrennstoffe als Substitut für fossile Brennstoffe - Energie- und Emissionsbilanzen
Juli 1998, 200 Seiten

- Band 49 P. Schaumann, M. Blesl, C. Böhringer, U. Fahl, R. Kühner, E. Läge, S. Molt, C. Schlenzig, A. Stuible, A. Voß
Einbindung des ECOLOG-Modells 'E³Net' und Integration neuer methodischer Ansätze in das IKARUS-Instrumentarium (ECOLOG II)
Juli 1998, 110 Seiten
- Band 48 G. Poltermann, S. Berret
ISO 14000ff und Öko-Audit - Methodik und Umsetzung
März 1998, 184 Seiten
- Band 47 C. Schlenzig
PlaNet: Ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung
Januar 1998, 230 Seiten
- Band 46 R. Friedrich, P. Bickel, W. Krewitt (Hrsg.)
External Costs of Transport
April 1998, 144 Seiten
- Band 45 H.-D. Hermes, E. Thöne, A. Voß, H. Desprez, G. Weimann, G. Kamelander, C. Ureta
Tools for the Dissemination and Realization of Rational Use of Energy in Small and Medium Enterprises
Januar 1998, 352 Seiten
- Band 44 C. Weber, A. Schuler, B. Gebhardt, H.-D. Hermes, U. Fahl, A. Voß
Grundlagenuntersuchungen zum Energiebedarf und seinen Bestimmungsfaktoren
Dezember 1997, 186 Seiten
- Band 43 J. Albiger
Integrierte Ressourcenplanung in der Energiewirtschaft mit Ansätzen aus der Kraftwerkseinsatzplanung
November 1997, 168 Seiten
- Band 42 P. Berner
Maßnahmen zur Minderung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aus der Lackanwendung - Vergleich zwischen Abluftreinigung und primären Maßnahmen am Beispiel Baden-Württembergs
November 1997, 238 Seiten
- Band 41 J. Haug, M. Sawillion, U. Fahl, A. Voß, R. Werner, K. Weiß, J. Rösch, W. Wölflé
Analysis of Impediments to the Rational Use of Energy in the Public Sector and Implementation of Third Party Financing Strategies to improve Energy Efficiency
August 1997, 122 Seiten

- Band 40 U. Fahl, R. Krüger, E. Läge, W. Rüdfler, P. Schaumann, A. Voß
Kostenvergleich verschiedener CO₂-Minderungsmaßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland
August 1997, 156 Seiten
- Band 39 M. Sawillion, B. Biffar, K. Hufendiek, R. Lux, E. Thöne
MOSAİK - Ein EDV-Instrument zur Energieberatung von Gewerbe und mittelständischer Industrie
Juli 1997, 172 Seiten
- Band 38 M. Kaltschmitt
Systemtechnische und energiewirtschaftliche Analyse der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland
April 1997, 108 Seiten
- Band 37 C. Böhringer, T. Rutherford, A. Pahlke, U. Fahl, A. Voß
Volkswirtschaftliche Effekte einer Umstrukturierung des deutschen Steuersystems unter besonderer Berücksichtigung von Umweltsteuern
März 1997, 82 Seiten
- Band 36 P. Schaumann
Klimaverträgliche Wege der Entwicklung der deutschen Strom- und Fernwärmeversorgung - Systemanalyse mit einem regionalisierten Energiemodell
Januar 1997, 282 Seiten
- Band 35 R. Kühner
Ein verallgemeinertes Schema zur Bildung mathematischer Modelle energiewirtschaftlicher Systeme
Dezember 1996, 262 Seiten
- Band 34 U. Fahl, P. Schaumann
Energie und Klima als Optimierungsproblem am Beispiel Niedersachsen
November 1996, 124 Seiten
- Band 33 W. Krewitt
Quantifizierung und Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Stromerzeugungssysteme
November 1996, 196 Seiten
- Band 32 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, T. Schulze, U. Fahl, A. Voß, A. Perrels, W. van Arkel, W. Pellekaan, M. O'Connor, E. Schenk, G. Ryan
Consumers' Lifestyles and Pollutant Emissions
September 1996, 118 Seiten
- Band 31 W. Rüdfler, A. Schuler, U. Fahl, H.W. Balandynowicz, A. Voß
Szenariorechnungen für das Projekt *Klimaverträgliche Energieversorgung in Baden-Württemberg*
Juli 1996, 140 Seiten

- Band 30 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, U. Fahl, A. Voß
Energy Consumption and Air-Borne Emissions in a Consumer Perspective
September 1996, 264 Seiten
- Band 29 M. Hanselmann
Entwicklung eines Programmsystems zur Optimierung der Fahrweise von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen
August 1996, 138 Seiten
- Band 28 G. Schmid
Die technisch-ökonomische Bewertung von Emissionsminderungsstrategien mit Hilfe von Energiemodellen
August 1996, 184 Seiten
- Band 27 A. Obermeier, J. Seier, C. John, P. Berner, R. Friedrich
TRACT: Erstellung einer Emissionsdatenbasis für TRACT
August 1996, 172 Seiten
- Band 26 T. Hellwig
OMNIUM - Ein Verfahren zur Optimierung der Abwärmenutzung in Industriebetrieben
Mai 1998, 118 Seiten
- Band 25 R. Laing
CAREAIR - ein EDV-gestütztes Instrumentarium zur Untersuchung von Emissionsminderungsstrategien für Dritte-Welt-Länder dargestellt am Beispiel Nigerias
Februar 1996, 221 Seiten
- Band 24 P. Mayerhofer, W. Krewitt, A. Trukenmüller, A. Greßmann, P. Bickel, R. Friedrich
Externe Kosten der Energieversorgung
März 1996, Kurzfassung, 40 Seiten
- Band 23 M. Blesl, C. Schlenzig, T. Steidle, A. Voß
Entwicklung eines Energieinformationssystems
März 1996, 76 Seiten
- Band 22 M. Kaltschmitt, A. Voß
Integration einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung in den konventionellen Kraftwerksverbund
Juni 1995, Kurzfassung, 51 Seiten
- Band 21 U. Fahl, E. Läge, W. Röffler, P. Schaumann, C. Böhringer, R. Krüger, A. Voß
Emissionsminderung von energiebedingten klimarelevanten Spurengasen in der Bundesrepublik Deutschland und in Baden-Württemberg
September 1995, 454 Seiten
- Band 20 M. Fishedick
Erneuerbare Energien und Blockheizkraftwerke im Kraftwerksverbund - Technische Effekte, Kosten, Emissionen
Dezember 1995, 196 Seiten

- Band 19 A. Obermeier
Ermittlung und Analyse von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen in Baden-Württemberg
Mai 1995, 208 Seiten
- Band 18 N. Kalume
Strukturmodule - Ein methodischer Ansatz zur Analyse von Energiesystemen in Entwicklungsländern
Dezember 1994, 113 Seiten
- Band 17 T. Müller
Ermittlung der SO₂- und NO_x-Emissionen aus stationären Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung
November 1994, 142 Seiten
- Band 16 A. Wiese
Simulation und Analyse einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland
Juni 1994, 223 Seiten
- Band 15 M. Sawillion, T. Hellwig, B. Biffar, R. Schelle, E. Thöne
Optimierung der Energieversorgung eines Industrieunternehmens unter Umweltschutz- und Wirtschaftlichkeitsaspekten - Wertanalyse-Projekt
Januar 1994, 154 Seiten
- Band 14 M. Heymann, A. Trukenmüller, R. Friedrich
Development prospects for emission inventories and atmospheric transport and chemistry models
November 1993, 105 Seiten
- Band 13 R. Friedrich
Ansatz zur Ermittlung optimaler Strategien zur Minderung von Luftschadstoffemissionen aus Energieumwandlungsprozessen
Juli 1992, 292 Seiten
- Band 12 U. Fahl, M. Fishedick, M. Hanselmann, M. Kaltschmitt, A. Voß
Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Minderungspotentiale energiebedingter CO₂-Emissionen durch einen verstärkten Erdgaseinsatz in der Elektrizitätsversorgung Baden-Württembergs unter besonderer Berücksichtigung konkurrierender Nutzungsmöglichkeiten
August 1992, 471 Seiten
- Band 11 M. Kaltschmitt, A. Wiese
Potentiale und Kosten regenerativer Energieträger in Baden-Württemberg
April 1992, 320 Seiten
- Band 10 A. Reuter
Entwicklung und Anwendung eines mikrocomputergestützten Energieplanungsinstrumentariums für den Einsatz in Entwicklungsländern
November 1991, 170 Seiten

- Band 9 T. Kohler
Einsatzmöglichkeiten für Heizreaktoren im Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland
Juli 1991, 162 Seiten
- Band 8 M. Mattis
Kosten und Auswirkungen von Maßnahmen zur Minderung der SO₂- und NO_x-Emissionen aus Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg
Juni 1991, 188 Seiten
- Band 7 M. Kaltschmitt
Möglichkeiten und Grenzen einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung am Beispiel Baden-Württembergs
Dezember 1990, 178 Seiten
- Band 6 G. Schmid, A. Voß, H.W. Balandynowicz, J. Cofala, Z. Parczewski
Air Pollution Control Strategies - A Comparative Analysis for Poland and the Federal Republic of Germany
Juli 1990, 92 Seiten
- Band 5 T. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß, J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt
Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Neckar-Alb
Juli 1990, 484 Seiten
- Band 4 T. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß, J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt
Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Hochrhein-Bodensee
Juni 1990, 498 Seiten
- Band 3 D. Kluck
Einsatzoptimierung von Kraftwerkssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung
Mai 1990, 155 Seiten
- Band 2 M. Fleischhauer, R. Friedrich, S. Häring, A. Haugg, J. Müller, A. Reuter, A. Voß, H.-G. Wystrcil
Grundlagen zur Abschätzung und Bewertung der von Kohlekraftwerken ausgehenden Umweltbelastungen in Entwicklungsländern
Mai 1990, 316 Seiten
- Band 1 U. Fahl
KDS - Ein System zur Entscheidungsunterstützung in Energiewirtschaft und Energiepolitik
März 1990, 265 Seiten

Inhalt

Die Energieeffizienz ist eine zentrale Säule der deutschen Energiewende. Ein Problem ist, dass die in Studien als wirtschaftlich identifizierten Energieeffizienzpotenziale nicht in Gänze realisiert werden. Als Grund werden unter anderem fehlerhafte Potenzialanalysen infolge der unzureichenden Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen diskutiert. Daher wird in dieser Arbeit die Rolle von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen bei der Bewertung von Energieeffizienzpotenzialen im industriellen Kontext analysiert.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden einleitend bestehende Limitierungen bei der Bewertung von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen diskutiert. Darauf aufbauend wird ein Verfahren zur integrierten Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt. Dieses wird als Bottom-up-Energienachfragemodell mit modular-hierarchischer Struktur und nicht linearer Programmierung am Beispiel von Querschnittstechnologien umgesetzt. Das entwickelte Verfahren kombiniert die endogene Berechnung des Endenergieeinsparpotenzials mit einem heuristischen Optimierungsansatz. Ferner ermöglicht das Energienachfragemodell die Berücksichtigung der heterogenen Ausprägung des Anlagenbestands, der unterschiedlichen Lastzustände einzelner Verbraucher sowie der Wechselwirkungen zwischen Technologien und Energieeffizienzmaßnahmen. Die Eignung des Verfahrens wird im Rahmen zahlreicher Variantenrechnungen am Beispiel von Querschnittstechnologien bewertet. Im Zuge dessen erfolgt eine vergleichende Analyse mit bestehenden Bewertungsverfahren.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird das entwickelte Energienachfragemodell im Rahmen einer Potenzialanalyse für Querschnittstechnologien am Beispiel der kunststoffverarbeitenden Industrie in Deutschland angewandt. Dabei wird ein durch eine gesteigerte Energieeffizienz induziertes wirtschaftliches Endenergieeinsparpotenzial von 11,6 % gegenüber dem Endenergieverbrauch der betrachteten Querschnittstechnologien ermittelt. Ein signifikanter Anteil des durch eine gesteigerte Energieeffizienz induzierten wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenzials ist auf die Optimierung der Kälteversorgung zurückzuführen. Zu den im Zuge der Potenzialanalyse identifizierten ‚no-regret-Maßnahmen‘ zählt speziell die freie Kühlung. Im Hinblick auf die formulierte Zielsetzung dieser Arbeit wird vor allem der Einfluss von Wechselwirkungen zwischen Energieeffizienzmaßnahmen analysiert. Durch die Vernachlässigung dieser Wechselwirkungen kommt es zu einer signifikanten Überschätzung der durch eine gesteigerte Energieeffizienz induzierten wirtschaftlichen Endenergieeinsparpotenziale.