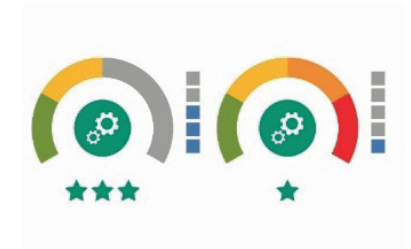
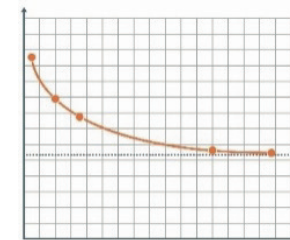
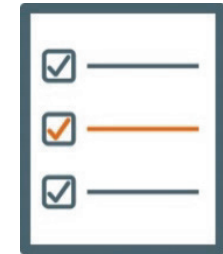
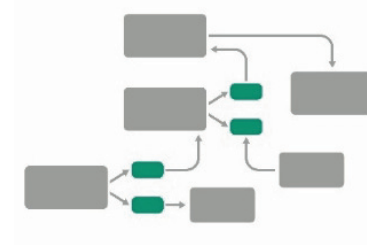




Methode der grenzwertorientierten Bewertung

– Energie- und Ressourceneffizienz von Gesamtbetriebsweisen –



Methode der grenzwertorientierten Bewertung

– Energie- und Ressourceneffizienz von Gesamtbetriebsweisen –

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Carsten Keichel

aus Magdeburg

genehmigt von der

Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften

der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

24. April 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

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

Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. habil. B. Lehmann
Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr. rer. nat. habil. H.-J. Gursky
Hauptberichterstatte:	Prof. Dr.-Ing. O. Carlowitz
Berichterstatte:	Prof. Dr.-Ing. B. Sankol

Dissertation Technische Universität Clausthal 2017

D 104

© **PAPIERFLIEGER VERLAG** GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2017
Telemannstraße 1 · 38678 Clausthal-Zellerfeld
www.papierflieger.eu

Urheberrechtlich geschützt, alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2017

ISBN 978-3-86948-590-4

Kurzfassung

Die qualitativ hochwertige und langfristig wirksame oder auch nachhaltige Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz kann nur unter ganzheitlicher Betrachtung erfolgen. Dazu wird in dieser Arbeit eine Methode zur Analyse und Bewertung von Gesamtbetriebsweisen dargestellt und mit Beispielen belegt. Basierend auf der Definition eines physikalisch, ingenieurtechnisch oder gesetzlich begründeten Referenzprozesses ist die Grenze aller Verbesserungsbemühungen festgesetzt.

Die erarbeitete Methode ermöglicht es, einen Prozess oder ein System von Prozessen im Hinblick auf diesen idealen Zustand zu analysieren und zu bewerten. Dabei wird zwischen einer leistungsbezogenen Betrachtung, zur Analyse des Prozessablaufes, und der mengenbezogenen Betrachtung, zur Bewertung des Verbesserungspotentials, unterschieden. Mittels der Bedarfs- und der Verbrauchsperspektive wird gezeigt, wie Systeme aus Ressourcen verbrauchenden Prozessen und Prozesse mit einem Energiebedarf in deren Gesamtheit bilanziell bewertet werden können. Die ideale Kapazität bestehender Apparate und Anlagen hat einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz der darin ablaufenden Prozesse. Die Methode zeigt, wie diese apparatetechnische Kapazität zu analysieren, zu bewerten und zu nutzen ist. Der Ablauf des methodischen Vorgehens wird in Form einer Systematik erläutert.

Ein wesentlicher Aspekt von Verbesserungen ist die Darstellung des Grades der Effizienz in Form von Kennzahlen. Eine Kennzahl, gebildet als Quotient zwischen dem idealen und dem realen Zustand, ist die Grundlage der Bewertung. Es wird gezeigt, wie mittels dieses universellen technischen Faktors weitere äquivalente Faktoren u.a. zur ökonomischen und ökologischen Bewertung der Gesamtbetriebsweise abgeleitet werden können.

Schlagworte: Betriebsweise, Effizienz, Energie, Grenzwert, Kennzahl, Methode, Prozess, Ressource, System, Systematik,

Abstract

The high-quality and long-term effective improvement of energy and resource efficiency can only take place under a holistic view. For this purpose, a method for analyzing and evaluating the overall operating modes is presented and supported by examples. The effort of all improvements are fixed, based on the definition of a physically or technical defined reference process.

The developed method allows it to analyze and evaluate a process or system of processes depending on this ideal state. A distinction is made between a performance-related consideration, the analysis of the process sequence, and the quantity-related consideration, for the assessment of the improvement potential. Two different perspectives show how systems of resource-consuming processes and processes with a need of energy can be assessed in their totality. The ideal capacity of existing apparatuses and systems has a considerable influence on the efficiency of the internal processes.. The method shows how this technical capacity can be analyzed, evaluated and used. The course of the methodological procedure is explained in the form of a systematic approach.

A key aspect of improvements is to show the degree of efficiency by indicators. The basis of the assessment is the relationship between the ideal and the real state. It is shown how by means of this universal technical factor further equivalent factors can be derived for the economic and ecological evaluation of the total operating mode.

Keywords: Operation, efficiency, energy, limit, KPI, method, process, resource, system, systematics

Inhalt

Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhalt.....	V
Abkürzungen.....	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIV
Formelzeichen	XV
Indizes.....	XVI
1 Einleitung.....	1
2 Stand des Wissens	3
2.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen.....	3
2.2 Anwendung und Management	4
2.3 Kennzahlen, Monitoring & Benchmark	7
2.4 Die Methode des physikalischen Optimums nach Volta	12
2.4.1 Definition des physikalischen Optimums	12
2.4.2 Bilanzierung, Methodik & Berechnung des physikalischen Optimums	13
2.4.3 PhO-Faktor	14
2.4.4 Systematiken	15
2.4.5 Werkzeuge	16
3 Grundlagen.....	21
3.1 Fachtermini	21
3.1.1 Physikalische Fachtermini	21
3.1.2 Energiewirtschaftliche Fachtermini	22
3.1.3 Energietechnische Fachtermini	23
3.1.4 Energiekenngrößen	24
3.1.5 Energiekennwerte für die ganzheitliche Bewertung	25
3.2 Bilanzierung.....	26
3.3 Erfassen und Verarbeiten von Daten	32
3.4 Produktion und Prozess	33
3.5 System und Systemmodell.....	34
3.6 Methodisches Vorgehen und adaptierbare Methoden	35
3.7 Indikatoren.....	37

4 Erweiterung der Methode des PhO	39
4.1 Erweiterung der Definition des physikalischen Optimums.....	39
4.2 Der PhO Faktor – Bedarf, Verbrauch und Nutzen	42
4.3 Dimensionsbehafteter PhO-Faktor	44
4.4 Der PhO-Leistungsfaktor	45
4.5 Trennung der Bewertung von Bestandsprozessen und geplanten Prozessen	48
4.6 Universeller Bezugszustand für eine spezifische Betrachtung	50
5 Grenzwertorientierte Systematik.....	52
5.1 Systematik zur Bewertung von Gesamtbetriebsweisen	52
5.2 Die Anwendung der Methode setzt System- und Prozessmodelle voraus	53
5.3 Die Anwendung der Methode setzt eine Bilanzierung voraus	59
5.4 Entscheidend für Verbesserungen ist die Genauigkeit des Modells	61
5.5 Die leistungsbezogene Bewertung verbesserte den Prozessablauf	65
5.6 Kopplung idealer Referenzprozesse.....	68
5.7 Kennzahlen zur ganzheitlichen Prozessbewertung	73
5.8 Kompakte Darstellung der Systematik.....	78
6 Anwendung der grenzwertorientierten Methode.....	79
6.1 Bilanzielle Prozessbewertung	80
6.1.1 Bilanzielle Prozessbewertung aus der Bedarfsperspektive	80
6.1.2 Bilanzielle Prozessbewertung aus der Verbrauchsperspektive	89
6.2 Bewertung der Prozesskapazität.....	95
7 Schlussbetrachtungen	104
7.1 Zusammenfassung	104
7.2 Ausblick	105
Anhang	106
Literaturverzeichnis.....	113

Abkürzungen

BF	Brownfield
BMUB	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
DIN	DIN Deutsches Institut für Normung
e.V.	eingetragener Verein
EDL-G	Energiedienstleistungsgesetz
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EG	Europäischen Gemeinschaften
EKP	externe Kopplungsprozesse
EN	Europäischen Norm
EnEG	Energieeinsparungsgesetz
EnergieStG	Energiesteuergesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnPI	Energy Performance indicator
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
evtl.	eventuell
GF	Greenfield
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
IKP	interne Kopplungsprozesse
ISO	International Organization for Standardization
KMU	kleine und mittelständische Unternehmen
KPI	Key Performance Indicator
KVP	kontinuierlichen Verbesserungsprozess
LCA	Life Cycle Assessment
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PEF	Primärenergiefaktor
PhO	Physikalische Optimum
PKK	Prozesskaskaden

S.	Seite
u.a.	unter anderem
u.U.	unter Umständen
v.l.n.r	von links nach rechts
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Zyklischer Ablauf eines Energieaudits mit der erwarteten Steigerung der Effizienz.....	6
Abbildung 2-2: Kontinuierliche Verbesserung nach DIN ISO 50001	7
Abbildung 2-3: Auszug aus der Übersicht der Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz (VDI 4800 2014, S.21).....	10
Abbildung 2-4: Darstellung der Berücksichtigung von Aufwänden (Grabowski et al. 2015, S.20).....	11
Abbildung 2-5: Das physikalische Optimum als Grenzwert der Effizienz am Beispiel von Elektromotoren (Volta 2014, S.35).....	13
Abbildung 2-6: Berechnung des PhO unter Berücksichtigung von Teilprozessen, IKP und EKP nach Volta (Volta 2014, S.35).....	13
Abbildung 2-7: Das betriebswirtschaftliche Optimum unter Berücksichtigung des PhO (Volta 2014, S.37).....	15
Abbildung 2-8: Übergeordnete Systematik nach Volta (Volta 2014, S.57).....	16
Abbildung 2-9: Vereinfachte Darstellung der erweiterten Pareto-Analyse nach Volta (vgl. Volta 2014, S.60)	17
Abbildung 2-10: Darstellung von Prozessen gleichen Linien gleichen Effizienzpotentials (vgl. Volta 2014, S.61)	18
Abbildung 2-11: Bewertung mittels des normierten Aufwands und normierten Nutzens.....	19
Abbildung 2-12: Erweiterte Verlustkaskade nach Volta	20
Abbildung 3-1: Darstellung von beispielhaften Bilanzräumen	28
Abbildung 3-2: 'gate to gate' Bilanzierung (VDI 4800 2014, S. 12).....	29

Abbildung 3-3: 'cradle to gate' Bilanzierung (VDI 4800 2014, S.13)	30
Abbildung 3-4: 'cradle to grave' Bilanzierung (VDI 4800 2014, S.11)	30
Abbildung 3-5: Systematik zur Datenerfassung und -analyse in Anlehnung an die (VDI 4661 2014, S.46).....	32
Abbildung 3-6: Kontinuierlicher Verbesserungsprozess unter Anwendung des PDCA-Zyklus	35
Abbildung 3-7: Systematisches Vorgehen nach der VDI-Richtlinie 2221 (VDI 2221 1993, S. 3: vgl. Blass 1981, Franke 1975 u. Lindemann 1980)	36
Abbildung 3-8: Methodisches Vorgehen unter Berücksichtigung von Innovationsstufen.....	37
Abbildung 4-1: Darstellung beispielhafter realer und idealer Energiebedarfe unterschiedlicher Prozesse.....	40
Abbildung 4-2: Gegenüberstellung des physikalischen Optimums eines Verbrauchsprozesses und eines Bedarfsprozesses.....	41
Abbildung 4-3: Die physikalisch optimale Leistung eines Prozesses im Vergleich zu der physikalisch optimalen Menge.....	41
Abbildung 4-4: Wechsel der Betrachtungsweise eines Prozesses.....	43
Abbildung 4-5: Verlauf des PhO-Leistungsfaktors in Abhängigkeit der Prozesszustände	45
Abbildung 4-6: Arbeits- und leistungsbezogene Darstellung des PhO-Faktors (v.l.n.r).....	47
Abbildung 4-7: Darstellung des PhO-Leistungsfaktors in Abhängigkeit der Prozessauslastung	48
Abbildung 4-8: Der ideale Referenzzustand muss eindeutig festgelegt sein	50
Abbildung 4-9: Spezifische unternehmensübergreifende PhOs mit einheitlichem Bezug auf den Prozess.....	51

Abbildung 5-1: Stufen der Systematik zur Bewertung von Gesamtbetriebsweisen.....	52
Abbildung 5-2: Stark vereinfachtes Systemmodell einer Fabrik	54
Abbildung 5-3: Beispiel innerbetrieblicher Energieflüsse in Anlehnung an die Darstellung nach Schmid (vgl. Schmid 2004, S.105)	55
Abbildung 5-4: Beispielhafte Wandlungsmatrix für Energie, Ressource und Information.....	56
Abbildung 5-5: Detaillierte Prozessbetrachtung mit Hilfe eines Energie- und Ressourcenfließbildes (Blesl et al. 2013, S.115)	56
Abbildung 5-6: Exemplarische Prozessschritte eines Prozessablaufes in der Stückgutfertigung	57
Abbildung 5-7: Exemplarische Prozessschritte eines Prozessablaufes in der Verfahrenstechnik	58
Abbildung 5-8: Exemplarische Prozessschritte eines Prozessablaufes in der Energietechnik.	58
Abbildung 5-9: Schematische Darstellung zur Bilanzierung eines Bilanzraumes	59
Abbildung 5-10: Sankey-Diagramm: Energiefließbild mit Energieträger, Energieform und Niveau (Müller et al. 2009, S.267)	60
Abbildung 5-11: Systemaufwand-Analyse für den Hauptprozess, erste bis dritte Peripherie und die Messdifferenz der Aufwandserfassung in Anlehnung an (Müller et al. 2009, S.266).	61
Abbildung 5-12: Das Verbesserungspotential kann nur ermittelt werden, wenn das physikalische Modell des Prozesses exakt ist.	62
Abbildung 5-13: Begriffsgraph zur Darstellung der Zusammenhänge bei der Wärmeerzeugung durch eine Kesselanlage analog der Darstellung von Schmid (Schmid 2004, S. 245).....	63
Abbildung 5-14: Verbesserung der Gesamtlast durch zeitliche Verschiebung der Einzellasten in Anlehnung an die Darstellung (vgl. Müller et al. 2009, S.97).....	65

Abbildung 5-15: Jahresganglinie der momentanen Leistungsaufnahme einer Druckluftversorgung	66
Abbildung 5-16: Darstellung der Jahresdauerlinie einer Druckluftversorgung erweitert um einen exemplarischen Nutzen und den resultierenden PhO-Leistungsfaktor	67
Abbildung 5-17: Verbesserung der leistungsbezogenen Effizienz durch gestufte Anfahrprozeduren in Anlehnung an (vgl. Müller et al. 2009, S.14)	68
Abbildung 5-18: Kopplungsvariante von Prozessen am Beispiel einer Druckluftversorgung mit anschließender Kühlung in Anlehnung an (Volta 2014, S. 69).....	69
Abbildung 5-19: Exemplarische Darstellung der perspektivischen PhO-Faktoren sowie des resultierenden PhO-Faktors des Gesamtsystems	70
Abbildung 5-20: Erweiterte Verlustkaskade zur Darstellung der Gesamtbetriebsweise unter Berücksichtigung der Prozessperspektiven.....	71
Abbildung 5-21: Die spezifische dynamische Effizienz eines redundanten Prozesses	73
Abbildung 5-22: Ganzheitliche und vergleichende Darstellung der spezifischen Effizienz bezogen auf den Nutzen „Produkt“ eines Prozesses mit Hilfe der spezifischen PhO-Faktoren	75
Abbildung 5-23: Ökonomische und ökologische PhO-Äquivalente eines Prozesses.....	76
Abbildung 5-24: Mehrdimensionale Verlustkaskade mit technischen, ökonomischen und ökologischen Äquivalenten.....	77
Abbildung 5-25: Ablauf der Systematik der grenzwertorientierten Methodik	78
Abbildung 6-1: Darstellung der drei gewählten Beispiele zur Anwendung der grenzwertorientierten Methode	79
Abbildung 6-2: Exemplarische Verbrauchs- und Bedarfsprozesse einer Fabrik	80

Abbildung 6-3: Beispiele für Systeme zur Bereitstellung von Warmwasser für sanitäre Zwecke.....	81
Abbildung 6-4: Warmwasserdurchfluss und summierte Zapfmenge entsprechend des Zapfprofils	82
Abbildung 6-5: Täglicher idealer Leistungsbedarf und idealer Wärmemengenbedarf zur Warmwasserbereitstellung	83
Abbildung 6-6: Leistungsbezogener und mengenbezogener PhO-Faktor einer dezentralen versorgten Warmwasserzapfung	85
Abbildung 6-7: Leistungsbezogener und mengenbezogener PhO-Faktor einer zentral versorgten Warmwasserzapfung	87
Abbildung 6-8: Verlauf der leistungs- und mengenbezogenen PhO-Faktoren einer zentralen und dezentralen Warmwasserversorgung unter Berücksichtigung des Zapfprofils.....	88
Abbildung 6-9: Wandlung von Primär- und Sekundärenergie in Endenergie	89
Abbildung 6-10: Erweiterte Verlustkaskade des Verbrennungsprozesses	93
Abbildung 6-11: Zusammensetzung der Übertragungsflächen eines Wärmeübertragungsapparates	96
Abbildung 6-12: Änderung der Ausgangstemperaturen durch die Vergrößerung der Übertragungsfläche.....	100
Abbildung 6-13: Ideale Kapazität eines bestehenden Wärmeübertragungsapparates.....	101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die ideale benötigte Wärme nach Art der Zapfung entsprechend des Zapfprofils..	83
Tabelle 2: Änderung der realen maximalen Wärmeleistung durch Sicherheiten behaftete Wärmeübertragungsflächen.....	98
λ Tabelle 3: Änderung der Medienausgangstemperatur durch Sicherheitszuschläge bei Wärmeübertragungsapparaten.....	99
Tabelle 4: Änderung der idealen Übertragungsleistung in Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors.....	101
Tabelle 5: Steigerung der absoluten und relativen Übertragungsleistung durch Ausnutzung der Überdimensionierung.....	101
Tabelle 6: Mittleres Zapfmuster für eine Familie mit Duschnutzung. Nach DIN EN 13203-2 (Lastprofil M) bzw. nach DIN EN 15316-3-1 (Zapfprogramm 2) sowie die ideale Wärmeleistung und Wärmemenge.....	112

Formelzeichen

Zeichen	Erläuterung	Einheit
A	Fläche	m ²
B	Bedarf	z.B. kWh
c _p	spezifische Wärmekapazität bei konstanten Druck	J/kg K
d	Durchmesser	m
E	Energie	J
f	leistungsbezogener Faktor	-
F	mengenbezogener Faktor	-
H	Enthalpie	J
H _i	Heizwert (inferior)	J/kg
H _s	Brennwert (superior)	J/kg
K	Kosten	€
k	Wärmedurchgangskoeffizienten	W/m ² K
l	Länge	m
m	Masse	kg
P	Leistung	W
Q	Wärme	J
REF	Referenzwert	-
S	Sicherheitsfaktor	-
t	Zeit	s
T, ϑ	Temperatur	K, °C
V	Volumen, Verbrauch	m ³ , z.B. kWh
w	Kesselnennleistung	W
W	Arbeit	J
X	Menge	z.B. Stück
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
η	Nutzungsgrad / Wirkungsgrad	%, -
λ	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient, Verbrennungsluftverhältnis	W/m K, -
ρ	Dichte	kg/m ³

Indizes

*	quasi	min	minimal
·	zeitliche Ableitung eines Wertes	n	normiert
a	außen	N	Normbedingung
abs	absolut	nutz	Nutzen
äq	äquivalent	p	Prozess
at	atomar	PE	Primärenergie
auf	Aufwand	PhO	physikalisches Optimum
B	Bedarf	R	Redundanz
BR	Bilanzraum	real	real
CH4	Methan	ref	Referenz
chem	chemisch	rel	relativ
CO2	Kohlenstoffdioxid	RG	Rauchgas
E	Edukte	RÖE	Rohöleinsatz
el	elektrisch	S	Sicherheit
ges	gesamt	SKE	Steinkohleneinsatz
gr	groß	stoff	stofflich
i	Zähler	th	thermisch
I	Investition	tr	trocken
in	innen	trans	Transmission
K	Kessel	u	Umgebung
kl	klein	V	Verbrauch
Kon	Kondensat	VL	Verlust
m	mittel	VS	Verschmutzung
max	maximal	Zapf	Zapfung
mech	mechanisch		

1 Einleitung

Die Verknappung von Ressourcen, steigende Preise aber auch der anwachsende Bedarf an Energie und Ressourcen sowie der Wandel des Klimas weckt ein immer größeres Interesse von Politik und Wirtschaft, schonend mit Ressourcen umzugehen. Im Rahmen der Energiewende strebt die Bundesregierung Deutschlands als politisches Mittel die ambitionierten Ziele an, die Treibhausgasemissionen in Deutschland im Vergleich zum Jahr 1990 bis zum Jahr 2020 um 40 % und bis zum Jahr 2050 um 80 % zu reduzieren. Der wesentliche Baustein besteht darin, fossile Energieträger durch erneuerbare Energien zu ersetzen, um den Primärenergiebedarf wesentlich zu senken. Bisher blieb die Wirksamkeit dieser Wende hinter den Erwartungen zurück.

Dem Einfluss der Effizienz auf den Energie- bzw. Ressourcenbedarf wurde bisher nicht die nötige politische Aufmerksamkeit gewidmet. Die gesetzlichen Vorgaben, getrieben durch den Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz, haben die Anzahl der bzgl. der Energieeffizienz zertifizierten Unternehmen gesteigert. Der Umgang mit dem Thema hat jedoch erst recht die Komplexität und Vielseitigkeit dieser Aufgabenstellung aufgedeckt. Dennoch wächst das politische Interesse daran, die Energiewende durch die Verbesserung der Energieeffizienz zu beschleunigen:

*„Energieeffizienz ist ganz entscheidend für das Gelingen der Energiewende und die Umsetzung der Ergebnisse der jüngsten Klimakonferenz in Paris. Efficiency First heißt: Energie, die wir einsparen, müssen wir nicht erzeugen, speichern und transportieren“
(Sigmar Gabriel, Bundesminister für Wirtschaft und Energie, BMWI 2016).*

Die Vielzahl unternehmenseigener Verbesserungsprojekte sowie öffentlich geförderter Forschung liefert ebenso viele technische Konzepte, Verbesserungsmaßnahmen und innovative Technologien, die unternehmensübergreifend angewendet werden können. Mit Hilfe einer Fülle an unterschiedlichen Bewertungsmethoden und Kennzahlensystemen wird versucht, die Wirksamkeit der Übertragung vielversprechender Ansätze vorherzusagen. Allerdings liegt das Defizit konventioneller Methoden darin, dass die Grenzen der möglichen Verbesserung nicht aufgezeigt oder berücksichtigt werden. Fortschrittlichen Unternehmen fällt es zunehmend schwer, weitere Verbesserungsmaßnahmen sowohl technisch als auch ökonomisch zu bewerten. Das Risiko ist auf Grund der ungewissen Wirksamkeit und dem scheinbar nicht endendem Verbesserungspfad zu hoch und schreckt vor Investitionen ab. Weniger fortschrittlichen

Unternehmen bleibt auf Grund der mangelnden Kenntnis über den ultimativen Referenzzustand nur die Möglichkeit, den Verbesserungspfad fortschrittlicher Unternehmen zu wiederholen. Das vollständige nationale Potential, den Zielen der Energiewende durch die Steigerung der Effizienz näher zu kommen, ist daher nicht abschätzbar.

Mit der Definition eines idealen Referenzprozesses und dem methodischen Vorgehen zum Vergleich des realen Verbrauchs zu dem idealen Verbrauch von Prozessen schuf Volta neue Möglichkeiten zur Bewertung der Effizienz, in dem die Grenzen der Verbesserungen eindeutig festgelegt sind. Volta erarbeitete eine Möglichkeit den Verbrauch von Ressourcen rückwirkend mengenbezogen zu analysieren und zu bewerten. Für die Bewertung des Wasserverbrauchs eines exemplarischen Produktionsprozesses war der Ansatz von Volta, vor allem aus ingenieurtechnischer Sicht, ein hervorragender innovativer Ansatz. Dennoch muss der Ansatz von Volta erweitert werden, um der Komplexität der Prozesse, den Bemühungen die Effizienz zu steigern und der Vielseitigkeit des mit dieser Aufgabe anvertrauten Personenkreises gerecht zu werden.

In dieser Arbeit wird Voltas Ansatz des „physikalischen Optimums“ (Volta 2014) als Grundlage für eine grenzwertorientierte Bewertung aufgegriffen und sich der Komplexität der Verbesserung der Energie- bzw. Ressourceneffizienz systematisch und methodisch genähert. Es wird gezeigt, dass die Verbesserung nur durch umfangreiche Kenntnis des realen betrachteten Prozesses, dessen Grenzen und des beteiligten Systems möglich ist. Dazu werden die folgenden Ansätze detailliert behandelt, an Beispielen diskutiert und in einem systematischen Ablauf dargestellt.

- Erweiterung der rückwirkenden mengenbezogenen Bewertung um eine gegenwärtig leistungsbezogene Prozessbewertung zur Analyse der momentanen Effizienz,
- Einführung der perspektivischen Trennung von Verbrauchs- und Bedarfsprozessen zur Bewertung der Gesamtbetriebsweise von Produktionsstandorten,
- Bildung universeller grenzwertorientierter Kennzahlen zur ganzheitlichen Darstellung der Effizienz von Prozessen, u.a. aus ökonomischer und ökologischer Sicht
- Bewertung der idealen Kapazität von an Prozessen beteiligten Apparaten als Alternative zur bilanziellen Prozessbewertung

2 Stand des Wissens

Mit steigenden Bemühungen, schonend mit Energie und Rohstoffen umzugehen, nimmt auch die Anzahl an Methoden, individuellen Lösungen oder Ansätzen, die Effizienz von Prozessen zu verbessern, zu. Neben wissenschaftlichen Arbeiten sind unternehmenseigene Strategien und Vorgehensweisen der Öffentlichkeit nicht zugänglich. Dennoch basiert der überwiegende Teil aller individuellen Verbesserungsmethoden auf dem öffentlich zugänglichen Wissen. Zur Darstellung des Standes des Wissens zur Analyse und Bewertung der Effizienz von Prozessen wird sich aus der Perspektive des Unternehmens genähert. Daher werden neben dem rechtlichen Rahmen – als gesetzlicher Treiber zur Steigerung der Effizienz – die in diesen Gesetzen verankerten Normen dargestellt. Darüber hinaus stehen den Unternehmen europäische und nationale Normen oder eine Vielzahl an Richtlinien (z.B. des Vereins Deutscher Ingenieure e.V.) zur Verfügung. Neben anwendungsorientierten Ansätzen zur Strukturierung und Durchführung von Verbesserungsprozessen behandeln Normen und Richtlinien das Thema der Bildung von Kennzahlen. Exemplarisch für unternehmenseigene Bewertungsmethoden wird eine ministeriell beauftragte Bewertungsmethode dargestellt. Abschließend wird die in der Dissertation von Volta entwickelte Methode des physikalischen Optimums (Volta 2014) detailliert dargestellt, um die Basis für die Weiterentwicklung mittels der vorliegenden Arbeit zu ermöglichen.

2.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Eine Basis für das Erreichen der von den EU-Mitgliedstaaten gesteckten Ziele bzgl. der Energieeffizienz sind die von der EU geschaffenen Rahmenbedingungen, z.B. durch ein europäisches Ordnungsrecht. Dazu zählen u.a.:

- Richtlinie 2003/96/EG Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom
- Richtlinie 2006/32/EG über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen (EDL-Richtlinie)
- Richtlinie 2009/125/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Ökodesign-Richtlinie)

Abgeleitet von den europäischen Rahmenbedingungen ist der Nationale Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) das zentrale Steuerungselement für die Energieeffizienzpolitik Deutschlands. Neben der Reduzierung der Energiekosten durch Energieeinsparung zielt der NAPE auf innovative Einsparmaßnahmen, neue Produkte und neue Geschäftsmodelle ab. Mit einer Vielzahl an Förderprogrammen, Marktanzreizprogrammen, Verbrauchsinformationen, Beratungsangeboten und freiwilligen Vereinbarungen hat Deutschland im EU-Vergleich eine hohe Anzahl angepasster spezifischer Instrumente eingeführt. Grundlage dafür bildet das Ordnungsrecht, was in den Bereichen vorrangig aus den folgenden Gesetzen besteht:

- Energieeinsparungsgesetz (EnEG)
- Energieeinsparverordnung (EnEV)
- Energiedienstleistungsgesetz (EDL-G)
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)
- Energiesteuergesetz (EnergieStG)

Aus diesem gesetzlichen Rahmen ergaben sich Vorteile, die den hohen Stand an Unternehmen, die bzgl. der Energie zertifiziert und auditiert sind, bewirkt haben. So ist besonders für energieintensive Unternehmen eine Zertifizierung nach DIN EN ISO 50001 eine mögliche Voraussetzung zur Reduzierung der EEG-Umlage. Des Weiteren ist der Nachweis über die Einführung eines Energiemanagementsystems nach DIN EN ISO 50001 die Voraussetzung für einen Spitzenausgleich. Die Novellierung des EDL-G zum Beginn des Jahres 2015 verpflichtet kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) dazu, in einem vierjährigen Rhythmus, den Energieverbrauch von einem akkreditierten Berater, z.B. im Rahmen eines Energieaudits nach DIN EN 16247, überprüfen zu lassen. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen tragen somit wesentlich dazu bei, dass Unternehmen die Steigerung der Effizienz kontinuierlich fortsetzen.

2.2 Anwendung und Management

Ein wesentlicher Baustein sind Normen, die den Ablauf eines Verbesserungsprozesses systematisch darstellen und Empfehlungen für den organisatorischen und strukturellen Ablauf in Unternehmen auflisten. Als etablierte Normen werden im Folgenden die DIN 16247 sowie die DIN EN ISO 50001 kurz dargestellt.

DIN EN 16247 - Energieaudits

Der erste Teil dieser europäischen Norm wurde im Oktober 2012 veröffentlicht. In dem Teil 1 - Allgemeine Anforderungen werden „die Anforderungen, allgemeinen Methoden und Ergebnisse von Energieaudits“ (DIN 16247-1 2012, S. 5) festgelegt. Darüber hinaus wurden bis 2014 vier weitere Teile veröffentlicht, die detailliert auf typische Fragestellungen im Rahmen eines Auditierungsprozesses eingehen.

- DIN EN 16247 - Teil 2: Gebäude
- DIN EN 16247 - Teil 3: Prozesse
- DIN EN 16247 - Teil 4: Transport
- DIN EN 16247 - Teil 5: Kompetenz von Energieauditoren

Die DIN EN 16247 erläutert ein systematisches Vorgehen eines Auditierungsprozesses zur Untersuchung des Energiebedarfs eines Unternehmens. Was wiederum die Grundlage zur Steigerung der Energieeffizienz bilden soll. Vorrangig kleine und mittlere Unternehmen wenden diese Norm an, um somit im Rahmen eines Energieaudits Klarheit in deren aktuellen Energiebedarf zu schaffen.

Abbildung 2-1 zeigt qualitativ den im EDLG (Fassung vom 22. April 2015) verankerten Ansatz, durch die Anwendung eines Energieaudits nach DIN EN 16247 im vierjährigen Zyklus und der Realisierung der abgeleiteten Maßnahmen die Energieeffizienz von Unternehmen stufenweise zu verbessern.

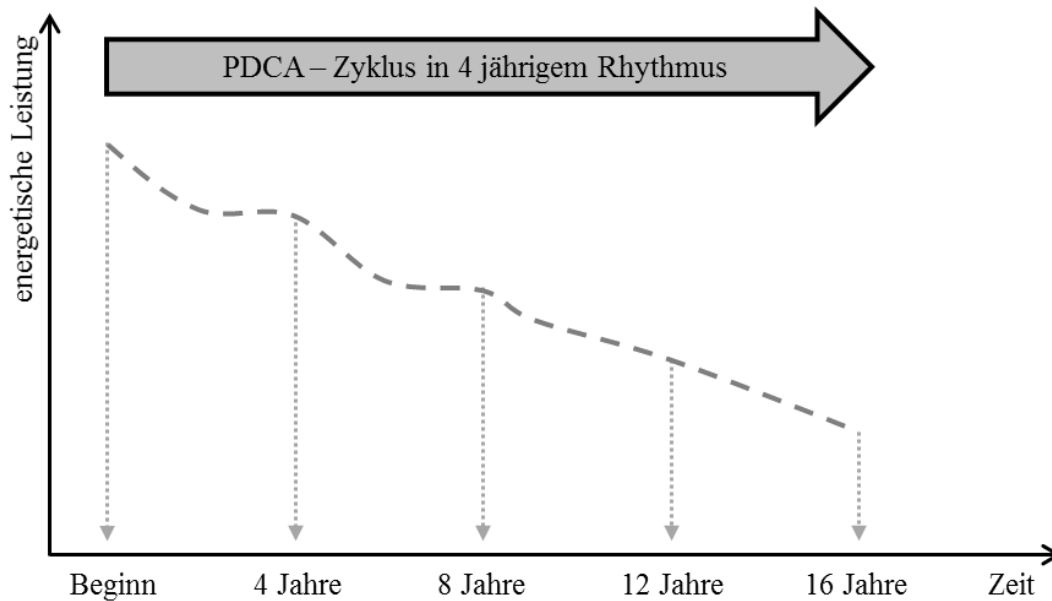


Abbildung 2-1: Zyklischer Ablauf eines Energieaudits mit der erwarteten Steigerung der Effizienz

DIN EN ISO 50001 - Energiemanagementsysteme

Im Dezember 2011 veröffentlicht, beinhaltet diese international gültige Norm Vorgaben bzgl. des Ablaufes, des Aufbaus und der Organisation eines systematischen Energiemanagements. Diese freiwillige Norm baut auf die energetische Transparenz des Unternehmens. Dazu ist der Energieeinsatz – Energiequellen, Energieformen, Energieflüsse, u.v.m. – des Unternehmens in regelmäßigen Abständen zu erfassen. Anhand dieser Analyse kann die Effizienz des Unternehmens bewertet werden und daraus Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz abgeleitet, realisiert und überprüft werden (vgl. DIN 50001 2011, S.7). Das Kernelement des in der DIN EN ISO 50001 verankerten kontinuierlichen Verbesserungsprozesses ist der PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act), durch den die Steigerung der Energieeffizienz von Unternehmen kontinuierlich erfolgen soll. Abbildung 2-2 zeigt den idealisiert Kurvenverlauf der Reduktion des benötigten energetischen Bedarfs.

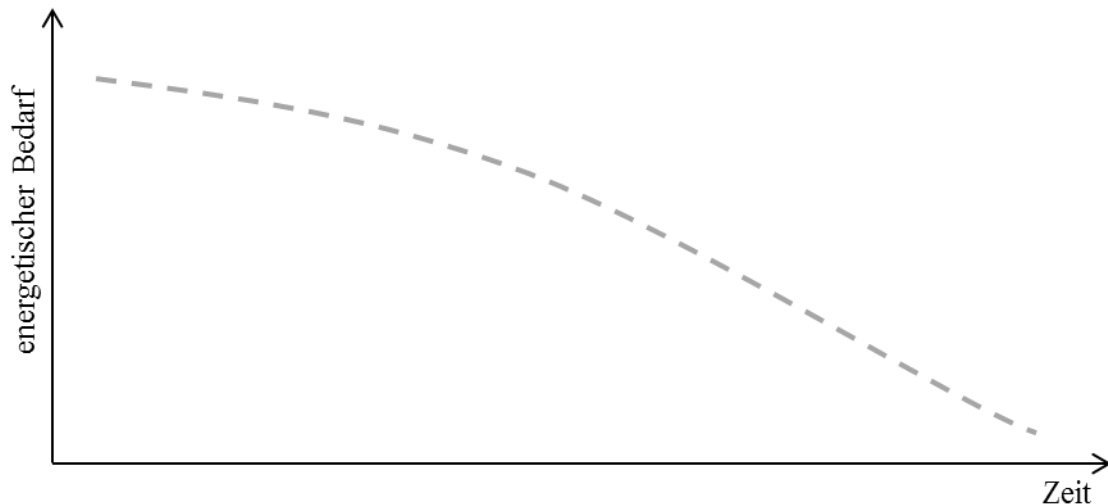


Abbildung 2-2: Kontinuierliche Verbesserung des energetischen Bedarfs nach DIN ISO 50001

Als größte Schwäche dieser beiden Normen ist die Unwissenheit über den zu erreichenden Grenzwert des zyklischen oder kontinuierlichen Verbesserungsprozesses zu nennen. Obwohl eine fortlaufende Verbesserung angestrebt wird, sind die Potentiale für Unternehmen, die bereits sehr fortschrittlich mit dem Thema Energieeffizienz umgehen, auf Basis dieser Normen nur schwer zu bestimmen und umzusetzen. Das bedroht wiederum die erneute Zertifizierung.

2.3 Kennzahlen, Monitoring & Benchmark

Mit wachsender Bedeutung finden Kennzahlen, auch Key Performance Indicator (KPI) genannt, Einzug in die Bewertung der Effizienz von Prozessen. Kennzahlen erlauben es, eine Vielzahl von Parametern eines Prozesses in einer quantitativen Größe zu vereinen. Daher ist es essentiell, eine für die Bewertung des Prozesses geeignete Kennzahl zu verwenden, um die Deutung der für den Prozess relevanten Einflüsse zu ermöglichen. Die reine zeitliche Darstellung der Effizienz wird Monitoring genannt. Das übergeordnete Ziel ist jedoch die vergleichende Bewertung unter Berücksichtigung eines Bezugspunktes (benchmark). Hierzu geben Normen, Richtlinien und eine Vielzahl von unternehmenseigenen Methoden Beispiele und erörtern Ansätze.

DIN EN 16212 - Energieeffizienz und -einsparberechnung

Diese europäische Norm beinhaltet Methoden und Regeln, um Kenngrößen zur Bewertung der Energieeffizienz zu erstellen. Dazu geht sie u.a. sowohl auf prozessbedingte Parameter als auch auf die Erfassung von Daten und deren Qualität ein.

Zur Berechnung des Effizienzpotentials werden in der Norm zwei methodische Ansätze (vgl. DIN 16212 2012, S.10) dargestellt. Die Top-Down-Methode analysiert Systeme aus der makroskopischen Perspektive. Damit können systematische Einflüsse auf die Effizienz berücksichtigt werden. Die Bottom-Up-Methode hingegen nähert sich der Problemstellung aus der mikroskopischen Perspektive. Einzeleffekte werden kumuliert oder skaliert, um die Wirkung auf das System vorherzusagen.

Unabhängig des gewählten Ansatzes empfiehlt die Norm als Kenngröße den Quotienten (indicator value - IND) aus dem normalisierten Energieverbrauch (normalised energy consumption - NEC) und dem durch die Betrachtung festgelegten Treiber (driver value - DV) für einen gewünschte Zeitraum (t).

$$IND(t) = \frac{NEC(t)}{DV(t)} \quad (1)$$

Auch wenn die DIN EN 16212 auf Basis der unternehmensüberreifenden als auch sektorenübergreifenden Betrachtung als Grundlage für eine Vielzahl an Normen dient, zeigt sie zwei wesentliche Schwächen. Zum einen gehen die spezifischen prozessbedingten Einflüsse auf die Effizienz des Systems verloren und zum anderen ist die Qualität der Bewertung für das Erreichen eines hohen Effizienzniveaus zu gering.

VDI 4600 - Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Diese Richtlinie berücksichtigt den Energieaufwand und die dazugehörigen Emissionen über den gesamten Lebensweg eines Produktes oder einer Dienstleistung. Somit soll „diese Richtlinie dazu beitragen, energietechnische Daten in einem einheitlichen Grundrahmen verfügbar und vergleichbar zu machen“ (VDI 4600 2012, S.2). Mit Hilfe der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwands (KEA) schafft diese Richtlinie einen wichtigen Kennwert für die Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse eines Systems unter Berücksichtigung der Umweltaspekte und potentiellen Umweltauswirkungen im Verlauf des Lebensweges eines Produktes. Die Betrachtung erstreckt sich von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, der Anwendung des Produktes, bis hin zu dessen Abfallbehandlung und ggf. des Recyclings des Produktes. Der KEA besteht somit aus den Teilsummen der Herstellung (KEA_H), der Nutzung (KEA_N) sowie der Entsorgung (KEA_E).

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E \quad (2)$$

Darüber hinaus berücksichtigt die Methode neben den kumulierten Energieverbräuchen ebenfalls den nicht energetisch genutzten Energieaufwand.

Obwohl es die Richtlinie zulässt, die Prozesskette und den Lebensweg eines Produktes sehr umfangreich zu analysieren und damit eine Bewertung zu ermöglichen, ist der Kennwert KEA für die produktionsspezifischen Fragestellungen zu allgemein gestaltet. Direkte Rückschlüsse auf prozessbedingte Einflüsse auf die Effizienz sind nur erswert abzuleiten.

VDI 4662 - Bildung, Implementierung und Nutzung von Energiekennwerten

Als „ein Leitfaden über den gesamten Optimierungsprozess der Energiewandlung, -verteilung und -nutzung“ (VDI 4662 2015, S.4) richtet sich diese Richtlinie an die Personen, die mit der Verminderung der Energieintensität ihres Unternehmens beauftragt sind. Die Richtlinie stellt den Nutzen von Kennwerten als Entscheidungsinstrument, Regel- oder Führungsgröße dar und erläutert sowohl die Chancen als auch die Risiken durch die Anwendung von Kennwerten.

Ohne konkrete Kennzahlen darzustellen, geht die VDI 4662 auf die Diskrepanz zwischen technischen und kaufmännischen Kennzahlen ein und stellt einen systematischen Ablauf zur Bildung, Dokumentation und Interpretation von unternehmensspezifischen Kennzahlen dar.

VDI 4800 - Ressourceneffizienz; Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien

Häufig sind die Bestrebungen, die Effizienz zu verbessern, auf Energie ausgerichtet. Dabei kann nur eine ganzheitliche Betrachtung aller an einem Prozess beteiligten Ressourcen zu einer nachhaltigen Steigerung der Effizienz führen. Die VDI 4800 bietet Handlungsansätze und Hilfestellungen zur Analyse und Bewertung von technischen Systemen, um u.a. den Einsatz von Rohstoffen zu reduzieren und Umweltbelastungen zu mindern (vgl. VDI 4800 2014, S.3).

Durch methodische Festlegungen der Systemgrenzen, Systemkomponenten und Zielstellung des Prozesses schafft die Richtlinie eine Grundlage für die detaillierte Betrachtung des Effizienzverbesserungsprozesses. Dazu werden Begriffe wie Nutzen oder funktionale Einheiten, Zurechnungsverfahren bei Kuppelprozessen, Indikatoren für Energie, Ressourcen sowie Ökosystemleistungen und der Umgang mit Zielkonflikten erläutert. Als ein wesentlicher Bestandteil der Richtlinie sind die Ausführungen bzgl. der Umsetzung in Produkten und Prozessen für alle im Betrieb einflussnehmenden Akteure aus unternehmensübergreifender Sicht zu erwähnen. Abschließend wird eine Vielzahl an strategischen Ansätzen und

Maßnahmen kurz dargestellt und an Beispielen erläutert, die eine Steigerung der Ressourceneffizienz ermöglichen sollen (siehe Abbildung 2-3).

Nr.	Strategie	Bezug		Einflussnehmender Akteur im Betrieb					Lebensphasen mit relevanten Auswirkungen				Lebensweganalyse				
		Produkt	Produktion	Produktentwicklung	Fabrikplanung	Arbeitsvorbereitung	Einkauf/Beschaffung	Produktion	Vertrieb	Rohmaterialherstellung	Produktherstellung	Nutzung	Verwertung/Beseitigung	Transport	erforderlich	bedingt erforderlich	nicht erforderlich
1	Werkstoffauswahl/Materialsubstitution	X		X						X	X	X	X	X	X		
2	Leichtbauweise	X		X						X		X		X		X	
3	Beanspruchungsgerechtigkeit und Sicherheit	X		X						X		X					X
4	Miniaturisierung	X		X						X	X	X	X	X	X		
5	Fertigungsgerechte Produktgestaltung	X		X		X		X			X					X	
6	Nutzungsgerechte Produktgestaltung	X		X								X		X	X		
7	Verlängerung der technischen Produktlebensdauer	X		X						X	X				X		
8	Verlängerung der Produktnutzungsdauer	X		X						X	X					X	
9	Produkt-Service-Systeme (Dematerialisierung)	X		X						X	X	X				X	
10	Kaskadennutzung von Produkten	X		X						X	X					X	
11	Reparierbarkeit	X		X						X	X					X	
12	Recyclinggerechte Produktgestaltung	X		X								X		X			
13	Bedienungsanleitung mit Hinweisen zum Nutzerverhalten	X		X								X					X
14	Ressourceneffiziente Gestaltung der Verpackung	X		X				X	X	X	X			X		X	
...	...																

Abbildung 2-3: Auszug aus der Übersicht der Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz (VDI 4800 2014, S.21)

ÖKOTEC – Methodik zur Aufstellung von Energiekennzahlen

Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) hat das Unternehmen ÖKOTEC Energiemanagement GmbH im Rahmen des Forschungsprojektes „Entwicklung einer Methodik zur Aufstellung von Energiekennzahlen zur Steigerung der Energieeffizienz in Unternehmen“ eine Methode entwickelt, die es ermöglichen soll, die Energieeffizienz in produzierenden Unternehmen einheitlich zu bewerten und zu überwachen.

Die Innovation der Methodik ist die Möglichkeit einer unternehmenseigenen Erarbeitung eines auf einem Baukastenprinzip beruhenden Kennzahlenkataloges. Ausgehend von grundlegenden Kennzahlen können im Laufe des methodischen Vorgehens weitere Kennzahlen auf Basis der Kombination vorhandener Kennzahlen abgeleitet werden.

Die Methodik zielt auf eine interdisziplinäre Anwendung, so dass sowohl Mitarbeiter mit ökonomischem, ökologischem oder ingenieurtechnischem Hintergrund die Methodik für deren spezifischen Aufgabenstellung verwenden können. Dazu baut die Methodik auf zwei Aspekte, dem Monitoring – eine kontinuierliche Prüfung des Systems – und der Bewertung – einem Soll-Ist-Vergleich des Systems mit sich selbst oder äquivalenten Systemen zur Einhaltung der Zielvorgaben. Auf Basis der zentralen Größen, Nutzen und Aufwand, sollen deckungsgleiche Systeme verglichen werden können. In die Bewertung fließen neben der Energie vorrangig alle energiebezogenen Aufwände, z.B. zur Bereitstellung von Stoffströmen oder Betriebsmitteln, in die Bewertung mit ein (siehe Abbildung 2-4).

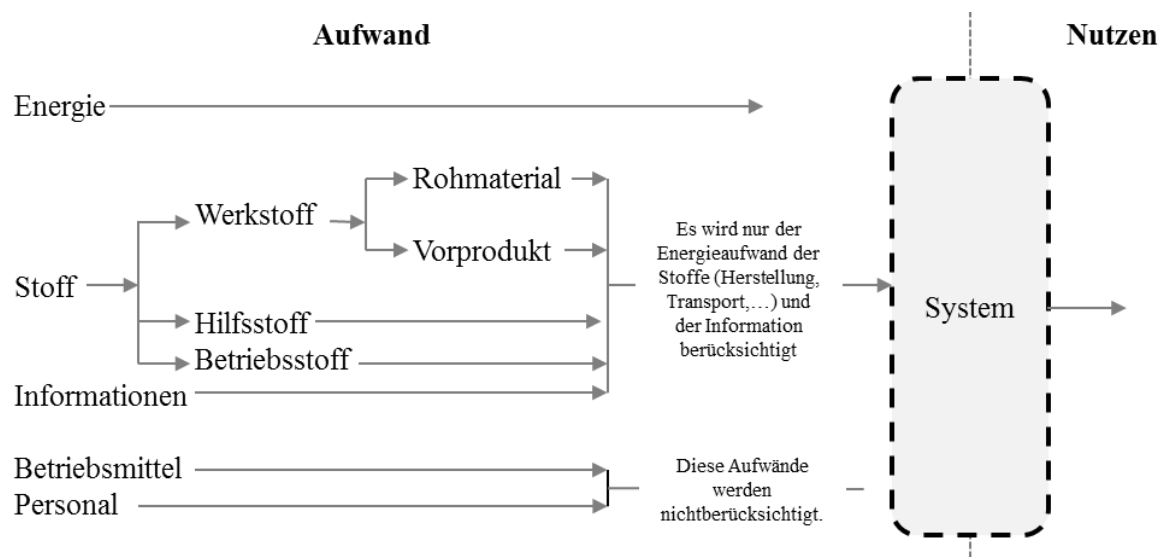


Abbildung 2-4: Darstellung der Berücksichtigung von Aufwänden (Grabowski et al. 2015, S.20)

Anhand des Quotienten dieser spezifischen Aufwände (Aufwandsgröße) und des jeweiligen Nutzens (Nutzensgröße) beschreibt die Methodik als Kennwert eine Teileffizienz. Zur Bewertung dieser Teileffizienzen wird ein Bewertungsfaktor eingeführt. Dieser ermöglicht es, den spezifischen Aufwand unter vergleichenden Bewertungsarten (Geld, Primärenergie und CO₂-Emissionen) zu bewerten. Durch die Einführung eines Gütegrades kann die Bewertung eines Systems mit mehreren Nutzen erfolgen.

Die Methodik nach ÖKOTEC bietet eine gelungene Möglichkeit der Bewertung der unterschiedlichen Nutzen und Aufwände eines Systems unter Berücksichtigung aller Unternehmensbereiche. Die dargestellte Systematik, die erläuterten Beispiele und die dazugehörigen Berechnungsvorschriften ermöglichen es sogar, komplexe Systeme zu bewerten. Als eine Schwachstelle ist die Nichtbetrachtung des eigentlichen Prozesses zu nennen. Prozessrelevante Einflüsse, das Verhalten der gekoppelten Prozesse eines Systems

sowie das dynamische Verhalten werden nicht berücksichtigt. Als weiterer Mangel werden als Bezug für die Bewertung historische Prozessdaten herangezogen. Eine Vorhersage des Verbesserungspotentials ist somit nicht möglich.

2.4 Die Methode des physikalischen Optimums nach Volta

Mit der Erarbeitung der Methode des physikalischen Optimums (vgl. Volta 2014) konnte Volta die größte Schwachstelle konventioneller Bewertungsmethoden zur Reduzierung des Energieverbrauchs ausschließen. Diese Methoden ermöglichen es u.U. durch Anwendung von Bewertungsmodellen den Energieverbrauch zu reduzieren, vernachlässigen dabei allerdings den minimalen Energieaufwand für den zu bewertenden Prozess. Im Wesentlichen betrachtet er die Wirkung von Maßnahmen durch die Analyse der Verbrauchs- oder Ertragswerte von Prozessen mit eigenen sehr geeigneten Werkzeugen. Die prozessbedingte Ursache für die Verbräuche bleibt unberücksichtigt. Volta ist es darüber hinaus gelungen, sowohl eine Systematik für die Durchführung von Verbesserungsprozessen im Sinne eines Managements zu erarbeiten als auch geeignete Kennzahlen für die individuelle Bewertung der Prozesse zu generieren.

2.4.1 Definition des physikalischen Optimums

Volta definiert das physikalische Optimum als ultimativen Referenzprozess. Unter Berücksichtigung der geltenden Randbedingungen der Physik, Chemie und Biologie ist das physikalische Optimum das Äquivalent eines optimalen Prozesses. Dieser ideale Referenzprozess kann nicht übertroffen werden. Dazu sind jedwede Formen von Verlusten durch instationäre Betriebsweise, Teillastverhalten, Reibung, Wärmeverluste, Verlust von Masse oder Änderung der Zusammensetzung auszuschließen. Des Weiteren wird der stoffliche und energetische Aufwand für die Lagerung nicht berücksichtigt. In Anlehnung an die Thermodynamik wäre ein solcher Prozess, wenn technisch oder physikalisch möglich, reversibel. Nach Voltas Definition liegt das physikalische Optimum als idealer Grenzwert zwischen realem Prozess und dem nicht realisierbaren Perpetuum Mobile. Als anschauliches Beispiel führt er die Klassifizierung von elektrischen Antrieben auf. So sank nach alten EU-Effizienzbewertungssystemen die Ziffer der Effizienzklasse mit steigender Effizienz. Durch die weiter voranschreitende Verbesserung der Wirkungsgrade erfolgt die Effizienzklassifizierung

von elektrischen Antrieben nun gleichgerichtet mit der Güte der Verbesserung. Als Grenze dieser Effizienzverbesserung führt er das physikalische Optimum an (siehe Abbildung 2-5).

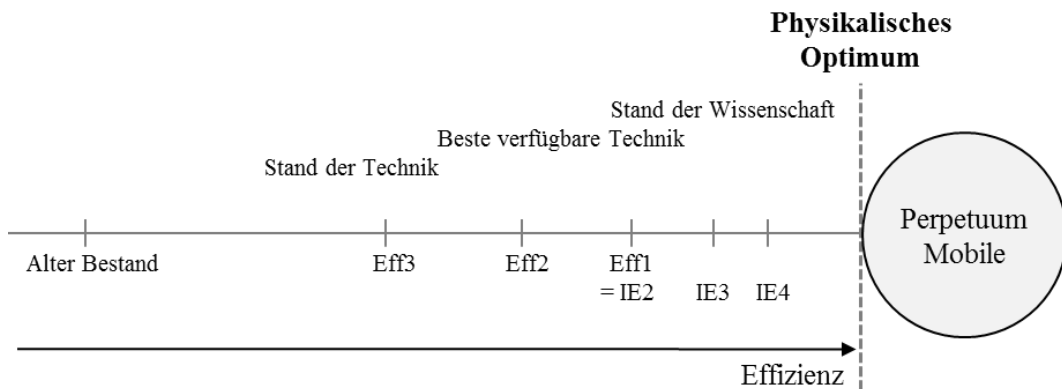


Abbildung 2-5: Das physikalische Optimum als Grenzwert der Effizienz am Beispiel von Elektromotoren (Volta 2014, S.35)

2.4.2 Bilanzierung, Methodik & Berechnung des physikalischen Optimums

Die Berechnung des physikalischen Optimums eines Gesamtprozesses setzt sich aus den physikalischen Optima der Teilprozesse zusammen. Als elementar für die Berechnung des physikalischen Optimums führt Volta die Definition und Berücksichtigung von Bilanzgrenzen auf. Neben den Teilprozessen, als klassische Bestandteile eines bilanzierbaren Systems, nennt er interne Kopplungsprozesse (IKP) und externe Kopplungsprozesse (EKP) (siehe Abbildung 2-6).

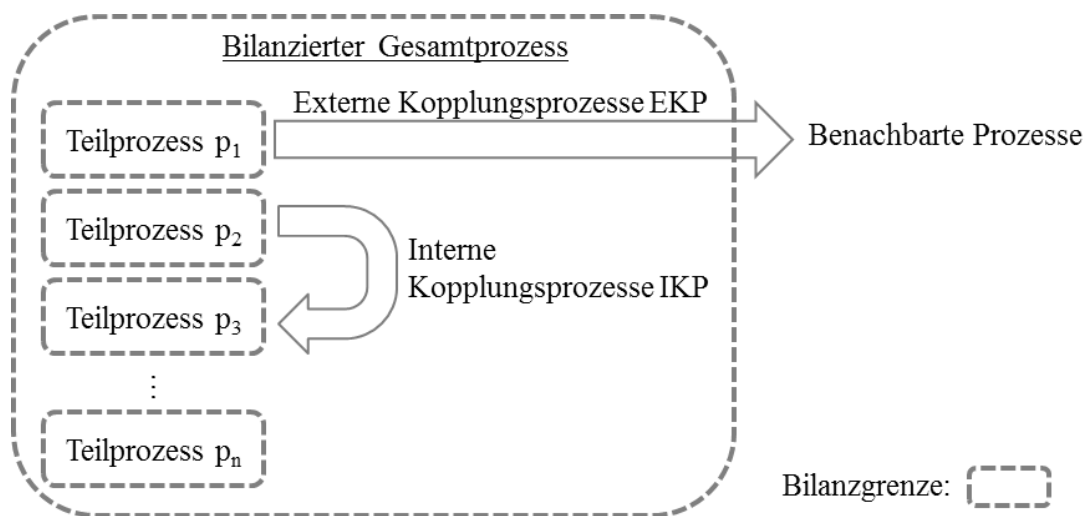


Abbildung 2-6: Berechnung des PhO unter Berücksichtigung von Teilprozessen, IKP und EKP nach Volta (Volta 2014, S.35)

Die Bewertung der Teilprozesse kann durch die Berücksichtigung adäquater Vergleichsprozesse erfolgen. Dazu ist der Gesamtprozess in ausreichend viele Teilprozesse zu zerlegen.

Für die Berechnung des physikalischen Optimums eines komplexen Prozesses werden die physikalischen Optima der Teilprozesse p_i aufsummiert und Effizienzsteigerung durch IKP sowie EKP abgezogen. Die Darstellung nach Volta bezieht sich dabei auf den physikalisch optimalen Verbrauch (V_{PhO}).

$$\begin{aligned} V_{PhO} &= V_{PhO,p1} + V_{PhO,p2} + \dots + V_{PhO,pn} - V_{IKP} - V_{EKP} \\ &= \sum_{p=1}^n (V_{PhO,pi}) - V_{IKP} - V_{EKP} \end{aligned} \quad (3)$$

Die Berechnung eines Prozesswirkungsgrades eines Teilprozesses erfolgt nach Volta durch das Produkt seiner Einzelwirkungsgrade i :

$$V_{PhO,p} = V_p \prod_i^n (\eta_i) \quad (4)$$

2.4.3 PhO-Faktor

„Optimierung bedeutet, das Optimum eines Prozesses zu definieren und diesen anschließend auf sein Optimum hin zu gestalten“ (vgl. Volta 2014, S.30). Als Maßstab für die Güte der Effizienz eines Prozesses, unter Berücksichtigung des individuellen physikalischen Optimums des Prozesses, definiert Volta den PhO-Faktor F_{PhO} (vgl. Volta 2014, S.36). In Voltas Darstellung ist F_{PhO} der Quotient aus dem realen Verbrauch des Prozesses (V) und dem physikalisch optimalen Verbrauch (V_{PhO}) des Prozesses. F_{PhO} zeigt somit den Mehrverbrauch eines Prozesses im Vergleich zu dessen physikalischen Optimum. Befände sich der Prozess in einem physikalisch optimalen Verbrauchszustand, wäre der PhO-Faktor gleich Eins.

$$F_{PhO} = \frac{V}{V_{PhO}} \geq 1 \quad (5)$$

Volta diskutiert zugleich den Grenzfall. Bei einem Prozess, der auch im idealen Fall keinen Verbrauch hat, z.B. für die Lagerung von Gütern, strebt der PhO-Faktor gegen unendlich. Nach Volta ist für solche Prozesse die Bewertung mit Hilfe des PhO-Faktors nicht anwendbar (vgl. Volta 2014, S.36).

$$\lim_{V_{PhO} \rightarrow 0} (F_{PhO}) = \lim_{V_{PhO} \rightarrow 0} \left(\frac{V}{V_{PhO}} \right) = \infty \quad (6)$$

Der von Volta erarbeitete Bewertungsmaßstab bzgl. des Verhältnisses eines realen Prozesses zu dem theoretisch möglichen idealen Prozess bezieht sich ausschließlich auf den Verbrauch von Ressourcen sowie der Verwendung von Energie. Obwohl die Verbrauchskosten eines Prozesses mit dessen Effizienz direkt korrelieren, sind aus Sicht der Wirtschaftlichkeit von Verbesserungsmaßnahmen die dafür notwendigen Investitionskosten zu berücksichtigen. Das Bestreben nach effizienteren Prozessen hat nach Volta höhere Investitionskosten zur Folge. Aus diesem funktionalen Zusammenhang zwischen Investitionskosten (K_I) und Verbrauchskosten (K_V) resultiert ein betriebswirtschaftliches Optimum, welches nicht deckungsgleich mit dem physikalischen Optimum ist (siehe Abbildung 2-7).

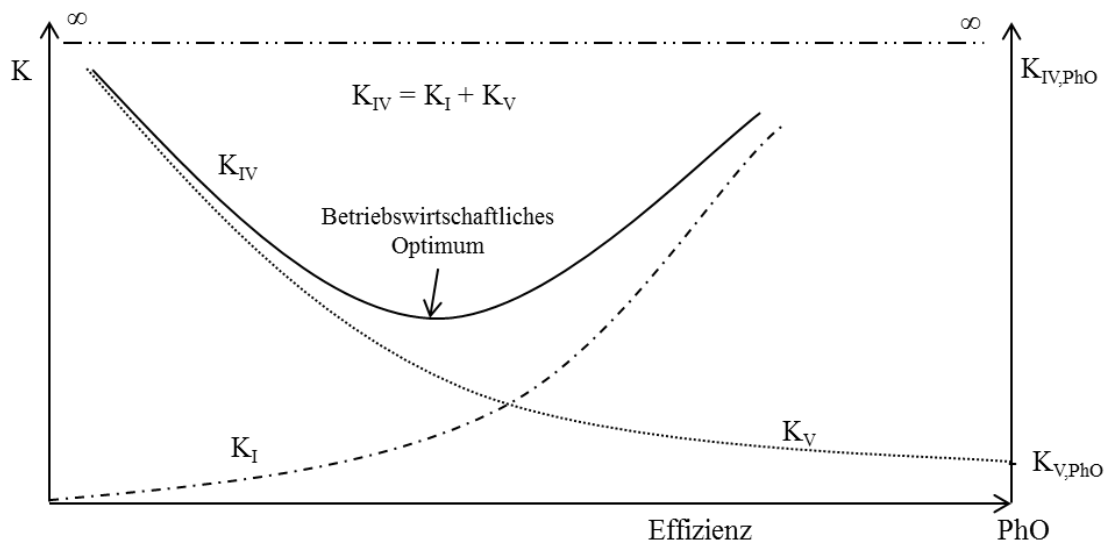


Abbildung 2-7: Das betriebswirtschaftliche Optimum unter Berücksichtigung des PhO (Volta 2014, S.37)

2.4.4 Systematiken

Volta erweitert den konventionellen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) von bestehenden Produktionsprozessen um das methodische Herangehen unter Verwendung des „Physikalischen Optimums“. Die von Volta dargestellte übergeordnete Systematik (siehe Abbildung 2-8) besteht aus drei wesentlichen Bestandteilen:

- Optimierung im Bestand
- Realisierung externer Kopplungsprozesse
- Realisierung einer neuen Fabrik

Als Basis für den Vergleich der möglichen Handlungsstränge dient das PhO. Somit können die jeweiligen Potentiale vergleichbar und ganzheitlich analysiert und für die angestrebte Verbesserung berücksichtigt werden.

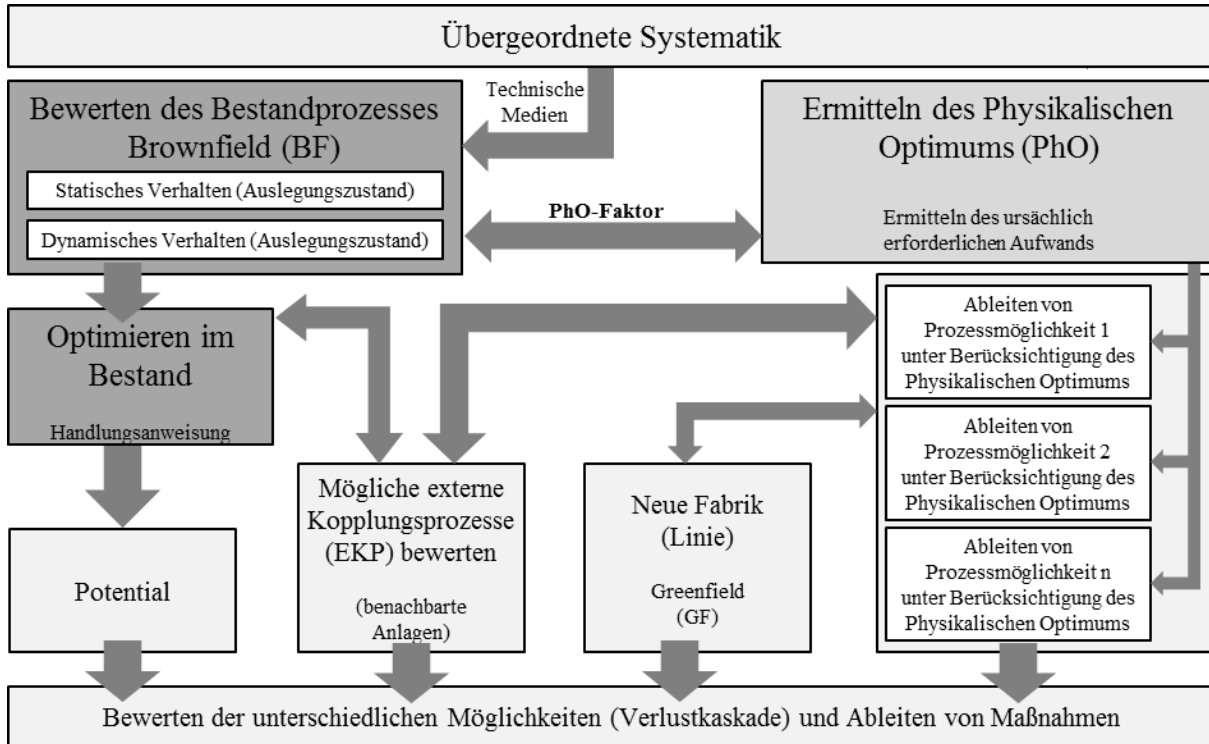


Abbildung 2-8: Übergeordnete Systematik nach Volta (Volta 2014, S.57)

Ausgangspunkt für die vergleichende Analyse der übergeordneten Systematik ist die Bewertung des Bestandprozesses. Neben geeigneten Messungen, abhängig von der Komplexität des zu bewertenden Prozesses, werden u.U. auch Simulationen herangezogen, um eine Bewertung zu ermöglichen. Darüber hinaus zeigt Volta auf, dass die Qualität der Messung entscheidend für die spätere Bewertung des Prozesses und somit für die Planung von Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz ist. Trotz ggf. höherer Investitionskosten für detaillierte Messungen, hängt der mögliche Nutzen von der Güte der messtechnischen Erfassung der Prozesse ab.

2.4.5 Werkzeuge

Als Teil der übergeordneten Systematik nutzte Volta Analysen und die dazugehörigen Darstellungsweisen, die aus der Energie- und Verfahrenstechnik sowie dem Bereich der Wirtschaft bereits bekannt sind und umfangreich verwendet werden. Er erweitert diese um die Kenntnis des physikalisch idealen Prozesses. Da diese Erweiterung die Bewertung, die

Einordnung der Prozesse und die Wirksamkeit von Maßnahmen auf den Teilprozess oder das Gesamtsystem darstellen lassen, werden diese im Folgenden als Werkzeuge bezeichnet.

Das Pareto-Prinzip besagt, dass 80 % der Ergebnisse eines Prozesses mit nur 20 % des Aufwands erzielt werden können und für das Erreichen der übrigen 20 % des Ergebnisses der erhebliche Aufwand von 80 % benötigt wird. Dieses Ungleichgewicht zwischen Aufwand und Nutzen wird in der Regel auch der Verteilung des Energie und Ressourcenverbrauchs von Prozessen zugesprochen. Somit würden wenige Verbraucher den anteilig größten Verbrauch verursachen und damit auch das größte Potential zur Steigerung der Effizienz bieten.

Mit der Analyse des Werkswasserverbrauchs konnte Volta dieses Prinzip bezogen, auf das Verbesserungspotential für das bewertete Werk, widerlegen (vgl. Volta 2014, S.92). Abbildung 2-9 zeigt vereinfacht die erweiterte Pareto-Analyse nach Volta. In Summe sind Verbesserungspotentiale der vielen kleinen Prozesse größer als das Potential eines ressourcenintensiven Prozesses. Vermutlich erfahren ressourcenintensive Prozesse unter Berücksichtigung des Pareto-Prinzips im Rahmen des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses einen höheren Stellenwert und sind damit auf einem höheren Effizienzniveau als kleinere Prozesse. Eine weitere Erkenntnis der erweiterten Pareto-Analyse ist die Differenz zwischen der messtechnischen Erfassung an der Systemgrenze des Werks und der Summe der einzelnen Erfassung der Prozesse. Die Differenz entspricht der Güte der Erfassung von Energie und Ressourcen und ermöglicht somit eine Aussage, ob alle relevanten Verbräuche in die Analyse mit einfließen.

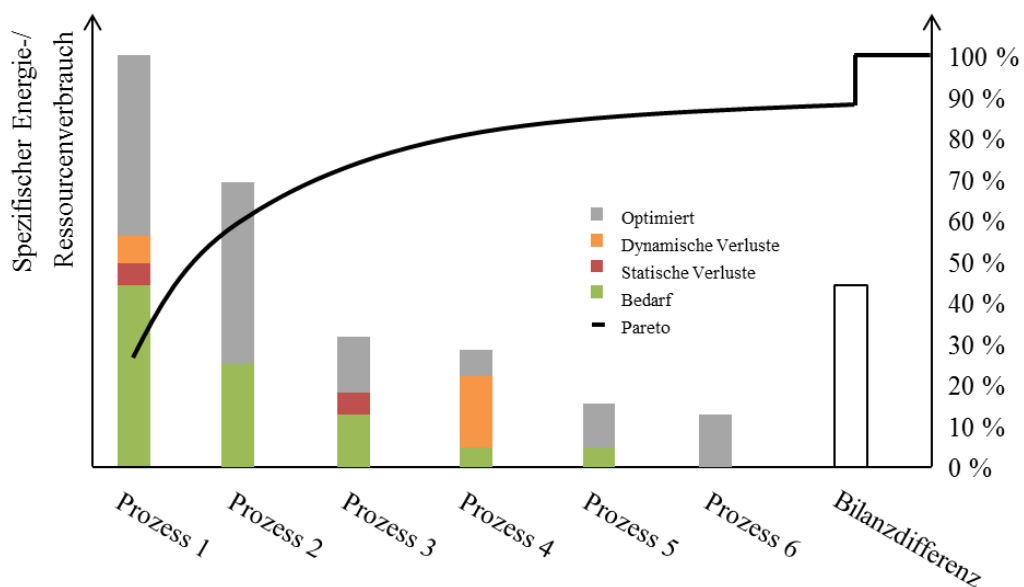


Abbildung 2-9: Vereinfachte Darstellung der erweiterten Pareto-Analyse nach Volta (vgl. Volta 2014, S.60)

Als Ergänzung der Pareto-Analyse führt Volta die Potentialanalyse ein. Dabei definiert er das Potential als Produkt aus dem PhO-Faktor und dem Verbrauch. Hohe Verbräuche in Kombination mit hohen PhO-Faktoren führen zu hohen Potentials. Abbildung 2-10 zeigt exemplarisch Linien gleichen Potentials. Bei der Planung von Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz können ineffiziente Prozesse mit geringem Verbrauch das gleiche Potential bergen wie effiziente Prozesse mit hohem Verbrauch.

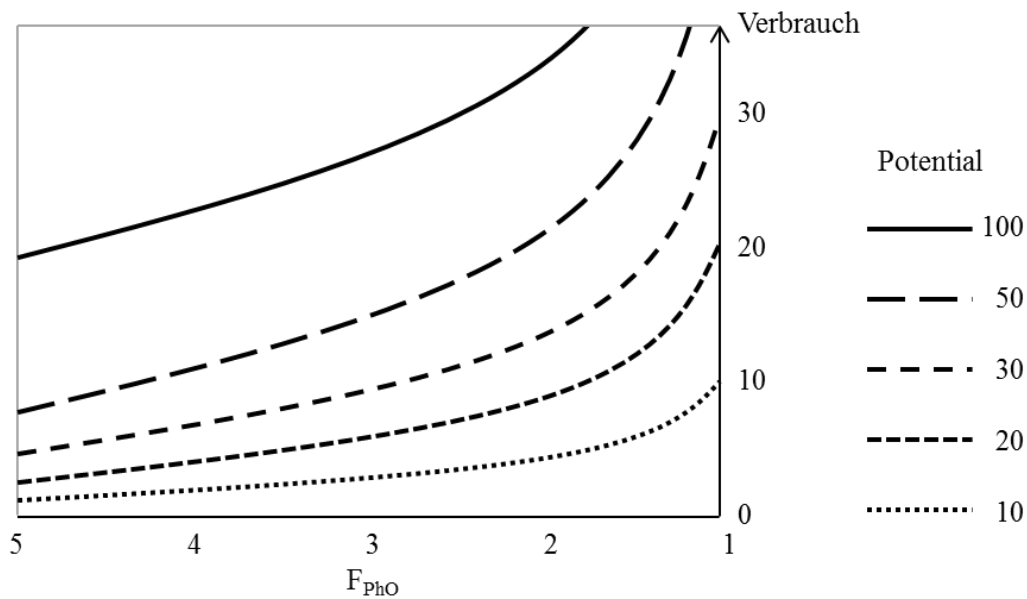


Abbildung 2-10: Darstellung von Prozessen gleichen Linien gleichen Effizienzpotentials (vgl. Volta 2014, S.61)

Produktionsprozesse werden häufig mit mehreren technischen Medien versorgt und innerhalb der Produktion in die jeweilige Nutzenergie gewandelt. Um dennoch die unterschiedlichen Formen der Nutzenergie und die Effizienz deren Nutzung vergleichend darstellen und bewerten zu können, stellt Volta die Nutzenergie ins Verhältnis zu der jeweilig für die Bereitstellung verwendeten Energieform dar. Je nach Betrachtungshorizont kann der tatsächliche Nutzen spezifisch zu der dafür eingesetzten Primärenergie oder dem technischen Medium dargestellt werden.

Durch die Kopplung von Prozessen kann die Effizienz des gekoppelten Systems besser sein als die der separaten Systeme. So führt Volta die Nutzung der Abwärme von Druckluftkompressoren für z.B. die Warmwasserbereitstellung an. Obwohl die Druckluftherzeugung trotz Kopplung nicht effizienter wird, kann dem Gesamtsystem der geringere Verbrauch gut geschrieben werden. Nach Volta wäre es sogar möglich, dass der reale Verbrauch geringer als der physikalisch optimale Verbrauch beider separater Prozesse ist.

Für die Betrachtung des dynamischen Verhaltens von Produktionsstätten, bezogen auf variable Produktionsleistung, greift Volta den Ansatz der Normierung der Kesselnennleistung ($w_{\text{nutz},n}$) und des dafür notwendigen Aufwands (w_{auf}) in Abhängigkeit des Nutzungsgrades (η_N) von Rouvel (vgl. Volta 2014, S. 76: vgl. Rouvel 2003) auf und überträgt diesen auf die Produktionsmenge. Als Ergebnis kann zwischen der normierten Produktionsmenge, dem normierten Nutzen, und dem dafür notwendigen normierten Aufwand ein linearer Zusammenhang hergestellt werden (siehe Abbildung 2-11).

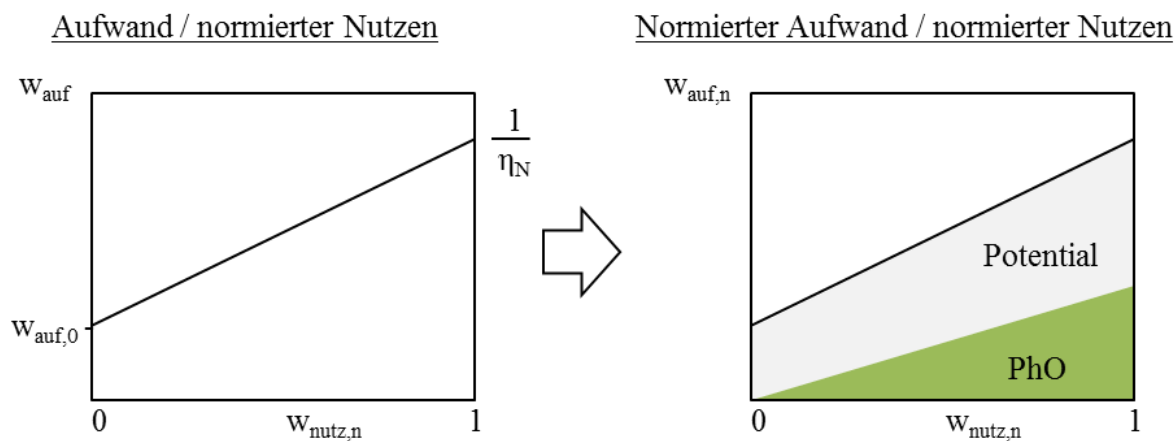


Abbildung 2-11: Bewertung mittels des normierten Aufwands und normierten Nutzens

Die Steigung ist dabei das Maß für den spezifischen Aufwand im Teillastfall und im Volllastfall. Der Ordinatenabschnitt ist das Maß für den Aufwand zur Aufrechterhaltung des Prozesses ohne einen Nutzen zu erzeugen. Darüber hinaus zeigt Volta in seiner Darstellung, dass im physikalisch optimalen Prozess kein Aufwand für die Bereithaltung des Prozesses notwendig ist.

Als abschließendes Werkzeug, welches eine chronologische oder Maßnahmen bezogene Darstellung des Verbesserungspotentials oder der Wirkung bereits realisierter Verbesserung erlaubt, führt Volta die erweiterte Verlustkaskade ein (siehe Abbildung 2-12). Ziel dieser Darstellung ist es Möglichkeiten aufzuzeigen und vergleichend darzustellen, um von einem Bestandsprozess (Brownfield BF) über einen neu realisierten Prozess (Greenfield GF) das physikalische Optimum erreichen zu können.

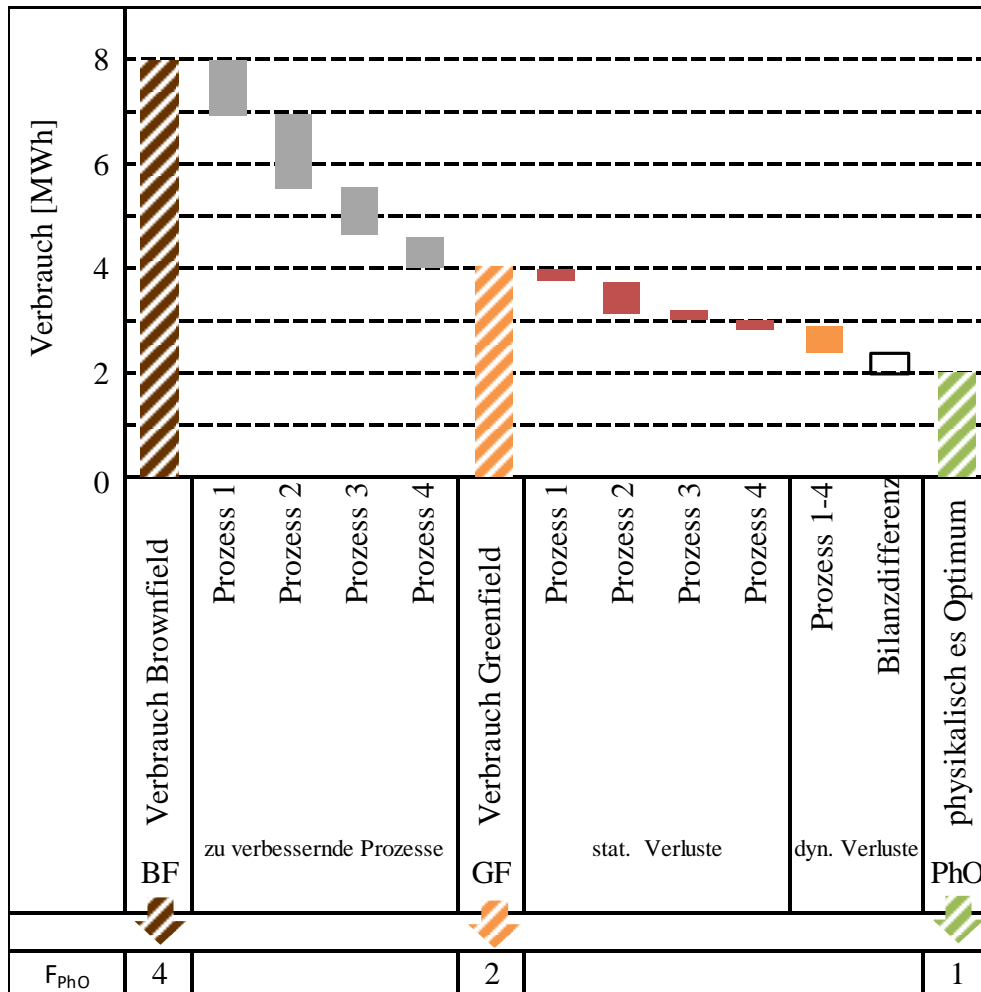


Abbildung 2-12: Erweiterte Verlustkaskade nach Volta

Links ist der Verbrauch einer Produktion im Zustand einer Brownfield-Fabrik dargestellt. Rechts schließen die möglichen Potentiale zur Reduktion des Verbrauchs durch die Verbesserung einzelner Prozesse an. Es sollte also möglich sein, durch die Verbesserung der Prozesse den Zustand einer neuen Produktion zu erreichen. Darüber hinaus sind weitere Verbesserungen bis hin zum physikalischen Optimum möglich. Allerdings sind diese u.U. nach aktuellem Stand aus technischer oder wirtschaftlicher Sicht weder sinnvoll noch realisierbar. Unterhalb der Grafik ist der jeweilige PhO-Faktor aufgetragen, der eine Einordnung der Maßnahmen und der Zustände in Bezug auf das physikalische Optimum erlaubt. Eine Unterschreitung dieses Optimums ist nur durch die Änderung des Produktes oder durch externe Kopplungsprozesse möglich.

3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Begrifflichkeiten und Ansätze dargestellt sowie der einheitliche Sprachgebrauch festgelegt. Die Ausführungen sind für das Verständnis der darauf folgenden Kapitel sowie für die Anwendung der Methode in bestehenden Managementsystemen und Prozessstrukturen notwendig.

3.1 Fachtermini

Für eine einheitliche Betrachtung, ein vergleichbares und nachvollziehbares Verständnis und eine eindeutige Wortbedeutung werden zunächst die definierten Begriffe in Anlehnung an die VDI 4661 für den Bereich der Energie- und Ressourceneffizienz aufgezeigt.

3.1.1 Physikalische Fachtermini

Energie

Als eine fundamentale physikalische Größe tritt Energie in unterschiedlichen Erscheinungsformen auf, die wiederum in zwei Klassen unterteilt werden können. Zum einen ist Energie ein Maß der in einem thermodynamischen System gespeicherten oder gebundenen Energiemenge und zum anderen ist Energie, im Sinne der Prozessenergie, ein Maß für die Wechselwirkung eines Systems mit einem anderen. Die System- und die Prozessenergie stehen daher in Wechselwirkung zu einander. Der erste und zweite Hauptsatz der Thermodynamik beschreiben dabei wie Energie von einer in die andere Form gewandelt werden kann.

- Die innere Energie (U) ist der in der Materie gespeicherte Energiegehalt. Als thermische Energie (E_{th}) wird dabei die auf Basis der thermischen Bewegung der Moleküle oder Atome einer Substanz gespeicherte Energie bezeichnet. Die chemisch gebundene Energie (E_{chem}) ist die in den Bindungen der Atome gespeicherte Energie. Zu der inneren Energie zählt ebenfalls die in den Atomkernen gebundene Energie (E_{at}).
- Als Zustandsgröße beschreibt die Enthalpie (H) die Summe aus innerer Energie und dem Energieaufwand für die Phasenumwandlung der betrachteten Materie.
- Mechanische Energie (E_{mech}) ist die in einem System gespeicherte potentielle oder kinetische Energie.

- Elektrische und magnetische Energie (E_{el}) ist die durch verschobene Ladung gespeicherte Energie und der dabei entstehenden elektromagnetischen Wechselfeldern.
- Verursacht durch Temperaturunterschiede wird Prozessenergie in Form von Wärme (Q) zwischen zwei Systemen übertragen.
- Arbeit (W) ist Prozessenergie die in einem mechanischem System übertragen wird.

Ressource

Ressourcen sind im Allgemeinen Mittel und können sowohl materielle als auch immaterielle Güter sein. Eine Ressource ist somit ein Oberbegriff für u.a. Geldmittel, Informationen, Arbeitskraft, Rohstoff, Zeit, Betriebsmittel und Energie. Im Sprachgebrauch der ingenieur- und betriebstechnischen sowie wirtschaftlichen Bereiche werden Ressource und Energie getrennt. Energie ist somit ebenfalls eine Form von Ressource. Der Begriff Ressource wird im Folgenden für alle prozessrelevanten Inputs, Outputs und notwendige Ausstattung zur Realisierung des durch den Prozess anvisierten Nutzens verwendet.

Leistung und Ressourcenstrom

Wird in einem Zeitintervall gespeicherte Energie in Form von Arbeit geleistet, ist der Quotient aus dieser Arbeit und dem Zeitintervall die mittlere Leistung (P) des Zeitintervalls. Die momentane Leistung kann nur unter Berücksichtigung infinitesimaler Zeitintervalle bestimmt werden.

$$P = dW/dt \quad (7)$$

Typische technische Leistungsangaben sind die Wärmeleistung oder der Wärmestrom \dot{Q} sowie die elektrische Leistung (P_{el}). Analog dazu können Ressourcen zeitlich aufgelöst betrachtet werden. Die Masse, die Stückzahl, der Personaleinsatz u.v.m. können ebenfalls über die Zeit aufgetragen werden.

3.1.2 Energiewirtschaftliche Fachtermini

Die Energiewirtschaft verwendet u.a. Begriffe wie Primärenergie, Sekundärenergie, Bezugsenergie, Endenergie, Zielenergie, Nutzenergie u.v.m. unter Angabe sehr unterschiedlicher Einheiten wie beispielsweise kWh, kgs_{KE} (Steinkohleneinsatz) oder kgr_{ÖE} (Rohöleinsatz). Es ist auf die korrekte Umrechnung zwischen den unterschiedlichen Einheiten

zu achten. Im Folgenden sind vor allem die nachstehend aufgeführten Fachtermini von Interesse:

Primärenergie

Der Energieinhalt der in der Natur vorkommenden und technisch noch nicht umgewandelten Energieträger wird als Primärenergie bezeichnet.

Endenergie

Gehandelte Energieformen, die der Erzeugung von Nutzenergie dienen, werden als Endenergie bezeichnet. In Eigenaufkommen gewonnene Energie aus z.B. regenerativen Quellen oder Abfallstoffen zählt nicht zu der Klassifizierung der Endenergie.

Nutzenergie

Die vom Verbraucher benötigten technischen Formen von Energie, wie Wärme, mechanische Energie, Licht, elektrische Energie usw., werden als Nutzenergie bezeichnet. Nutzenergie wird durch Energiewandler am Ort und zum Zeitpunkt des Bedarfs aus Endenergie erzeugt.

Thermodynamischer Mindestenergieaufwand

Bei der Veränderung eines zu behandelnden Gutes wird der Teil der in einem Prozess verwendeten Nutzenergie, der auf Grund chemischer und physikalischer Gesetzmäßigkeiten bestimmt werden kann, als thermodynamischer Mindestaufwand bezeichnet. Die Änderung der inneren Energie des Gutes durch dessen Erwärmung ist dafür ein gutes Beispiel. Der thermodynamische Mindestenergieaufwand beschreibt damit ausschließlich thermodynamische Änderungen. Er berücksichtigt weder die Qualität der Energie noch die Verwendung von Ressourcen.

Der thermodynamische Mindestenergieaufwand entspricht dem berechneten Nutzen in der Bedarfsperspektive, wie in dieser Arbeit S. 43 ff beschrieben.

3.1.3 Energietechnische Fachtermini

Die energietechnischen Fachtermini beschreiben bilanziell wie Energie in Systemen und Prozessen verwendet wird.

Energieumwandlung

Auch als Energieumformung oder Energiewandlung wird die Änderung einer Energieform in eine oder mehrere andere Energieformen bezeichnet. Die Geräte und Anlagen, wie z.B. Motoren, Öfen, Generatoren und Lampen, die eine Energieumwandlung ermöglichen, werden als Energiewandler bezeichnet.

Energieanwendung

Die Erzeugung von Nutzenergie aus Endenergie und die Wandlung von Nutzenergie für ihren jeweiligen Verwendungszweck wird Energieanwendung genannt.

Energiebedarf und Energieverbrauch

Als Energiebedarf wird die Menge an Endenergie bezeichnet, die notwendig ist, um einen definierten technischen Prozess durchführen zu können. Der Energieverbrauch ist die Menge unterschiedlicher Energieformen, die zur Deckung des Energiebedarfs notwendig ist. Obwohl nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik Energie nicht verbraucht sondern nur gewandelt werden kann, hat sich der Begriff des Energieverbrauchs im Sprachgebrauch festgesetzt.

Abwärme und Fortwärme

Die den Bilanzraum ungenutzt verlassende thermische Energie, die allerdings in einen angeschlossenen Prozess zur Abwärmenutzung Verwendung finden könnte, wird als Abwärme bezeichnet. Fortwärme ist dabei die thermische Energie, die nicht nachgenutzt werden kann und somit ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird.

3.1.4 Energiekenngrößen

Zur Analyse, Bewertung, Vergleich und Planung der Effizienz von Anlagen und Prozessen sind Kennzahlen ein praktikables Mittel. Im Wesentlichen beeinflussen die Anlagengröße, die Auslastung der Prozesse, die Produktqualität, die Art und Qualität der Rohstoffe und Energieträger sowie äußere Umwelteinflüsse die Energiekennwerte von Prozessen. Neben den individuellen und modernen Key Performance Indicators (KPIs) folgt ein Einblick in etablierte Energiekenngrößen.

Spezifischer Energiebedarf w

Für die energetische Bewertung von Prozessen, Maschinen und Anlagen ist der spezifische Energiebedarf eine der wichtigsten Kenngrößen. Nicht wie in der Thermodynamik auf die Masse bezogen, sondern auf prozess- oder produktrelevante funktionale Einheiten, ist die Spezifik das Verhältnis von z.B. Energieverbrauch pro Tonne Produkt (Industrie), Nutzenergie zu Endenergie (Energieumwandlung), Energieverbrauch je Transportgewicht und Entfernung (Gütertransport) oder Energiebedarf je Fläche und Zeit (Gebäudeklimatisierung).

Wirkungsgrade η

Der energetische Wirkungsgrad ist das Verhältnis zwischen der abgegebenen Zielenergie und der in einem Prozess dafür aufgewandten Energie im stationären Zustand. Dazu zählen u.a. der elektrische, der mechanische und der thermische Wirkungsgrad. In der Regel erfolgt die Angabe des Nennwirkungsgrades als stationärer Zustand im Nennlastfall. Eine variierende Prozessführung führt ggf. zu starken zahlenmäßigen Unterschieden der jeweiligen Momentanwirkungsgrade. Als quasistationär kann der mittlere Wirkungsgrad aus den Energieströmen über einen gewissen Zeitraum ermittelt werden.

Leistungszahl ε

Die Leistungszahl wird vorrangig bei linksläufigen Carnot-Prozessen verwendet, eignet sich allerdings für alle zusammengesetzten Energieumwandlungsprozesse. Die Leistungszahl ist der Quotient aus der gewünschten Zielenergie und der dafür aufgebrauchten Antriebsleistung.

Arbeitszahl b

Die Arbeitszahl ist vergleichbar mit der Leistungszahl. Durch die Bewertung eines längeren Zeitintervalls werden alle im Prozess auftretenden Betriebszustände, wie das An- bzw. Abfahren, Teillast oder Stillstand, berücksichtigt.

3.1.5 Energiekennwerte für die ganzheitliche Bewertung

Systeme und Prozesse sind in der Regel mit anderen Systemen und Prozessen gekoppelt und verwenden vergleichbare Versorgungslösungen mit Endenergie. Durch die Komplexität dieses Schwerpunktes werden nur einige Bewertungsmöglichkeiten dargestellt.

Kumulierter Energieaufwand KEA

Die Summe der primärenergetischen Aufwände für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Gutes bildet den kumulierten Energieaufwand (KEA).

Bereitstellungsnutzungsgrad g

Unter Berücksichtigung aller Vorketten der Bereitstellung eines Energieträgers erfolgt die Darstellung des Bereitstellungsnutzungsgrades durch das Verhältnis zwischen dem Energiegehalt des Energieträgers am Einsatzort und dem für die Bereitstellung notwendigen kumulierten Energieaufwand.

Energetische Amortisationszeit AZ

Die Definition der energetischen Amortisationszeit ist nicht einheitlich. So ist existiert keine eindeutige Festlegung darüber welcher Umfang an Kosten und Gutschriften für die Berechnung der Amortisation zu berücksichtigen ist. Allerdings wird mit dieser Kennzahl die Dauer angegeben, die notwendig ist bis sich eine Maßnahme aus energetischer Sicht amortisiert hat.

Energiekennwerte bei Koppelprozessen

Mit Hilfe einer Vielzahl von Allokationsmethoden werden die Faktoren eines gekoppelten Systems auf die Teilsysteme übertragen. Welche Methode geeignet ist, richtet sich vor allem nach den ökonomischen und ökologischen Kriterien. Typische Faktoren von Koppelprozessen sind z.B. Emissionen, Primärenergie, Endenergie und Energiekosten. Die Verteilung kann beispielsweise durch die Aufteilung nach Größe der erzeugten Energie (kalorische Methode), durch die Aufteilung des Arbeitswertes der Koppelprodukte (Arbeitswertmethode) oder die Zuordnung der Primärenergieeinsparung (finnische Methode) erfolgen.

3.2 Bilanzierung

Grundlage jeder Analyse eines Systems sowie zur Schaffung eines besseren Verständnisses über die stattfindenden Prozesse und Zusammenhänge ist die Bilanzierung. Da in Systemen generell drei Grundvorgänge, die Speicherung, der Transport und die Wandlung, existieren (vgl. Schütt et al. 1990, S. V), ist auch die Grundstruktur einer Bilanz analog zu anderen Bilanzen aufgebaut.

Das Ziel einer Bilanz ist es, das System und die darin ablaufenden Prozesse sowie die Interaktion mit der Umgebung mathematisch darzustellen und ggf. die Auswirkungen einer Änderung im Prozessablauf vergleichen zu können. Um diesem Ziel gerecht zu werden, sind einige Bedingungen bei der Erstellung einer Bilanz zu beachten.

Die Bilanzierung von Energie kann grob in zwei Arten (technisch und wirtschaftlich) unterschieden werden. Energiebilanzen für technische Systeme richten sich nach strengen räumlichen, zeitlichen, apparativen und prozesstechnischen Grenzen, um die ein- und austretenden Energiemengen eines Systems zu erfassen. Wirtschaftliche Energiebilanzen dienen dem statistischen Nachweis über das Aufkommen und die Verwendung von Energieträgern in einem Wirtschaftsraum. Eine Berücksichtigung des Nutzenergiebedarfs ist auf Grund der Komplexität von Wirtschaftsräumen nicht möglich.

Bilanzraum

Bilanzräume können sowohl einzelne Anlagen oder Apparate, Gruppen von Anlagen oder Fertigungsbereiche als auch ganze Produktionsstandorte einschließen. Ungeachtet des zu bilanzierenden Systems sind alle innerhalb des Bilanzraums enthaltenen Ressourcen und Ressourcenströme, die für die gewünschte Bilanz (z.B. Stoffbilanz, Energiebilanz, usw.) relevant sind, zu berücksichtigen. Ein Bilanzraum kann frei gewählt werden. Entscheidend für die Funktionalität der Bilanz ist die Gestaltung eines Bilanzraumes, der die gewünschten Prozesse oder Strukturen beinhaltet. So muss festgelegt werden, ob z.B. Hilfseinrichtungen oder prozessübergeordnete Strukturen in den jeweiligen Bilanzraum integriert werden sollen. In Abhängigkeit der technischen Ausstattung, der Prozesse, der Prozessführung und der Infrastruktur können innerhalb eines Bilanzraums weitere Bilanzräume existieren. Abbildung 3-1 zeigt in Anlehnung an die VDI 4661 drei Varianten von Bilanzräumen eines Systems bestehend aus dem Hauptprozess mit mehreren Prozessschritten sowie Hilfsanlagen.

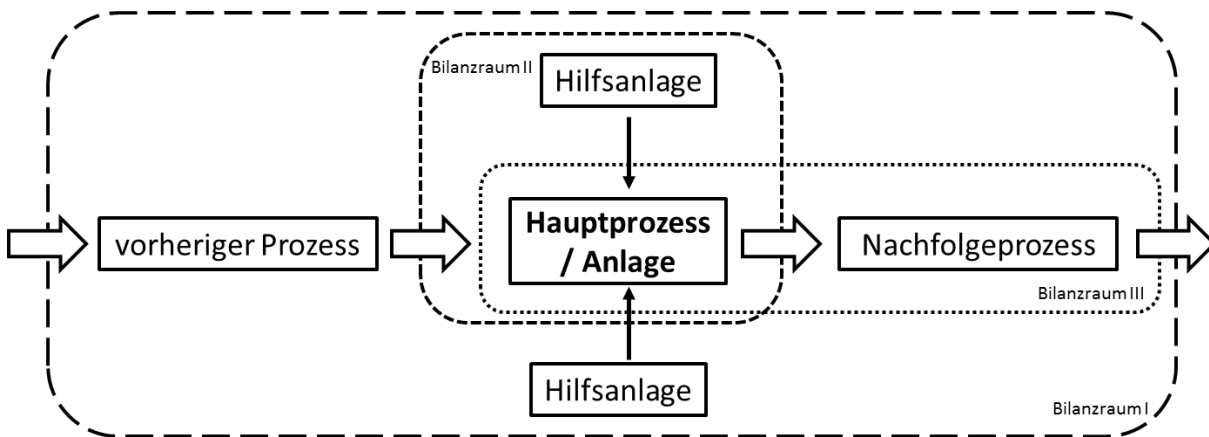


Abbildung 3-1: Darstellung von beispielhaften Bilanzräumen

Bilanzgrenzen

Zur Quantifizierung der Ressourcenströme sind die Bilanzgrenzen eines Bilanzraumes vor Beginn einer Analyse eindeutig festzulegen. Die Bilanz kann auf Basis des Inputs und Outputs eines Bilanzraums erstellt werden, ohne den Inhalt des Bilanzraums zu berücksichtigen. Somit kann die Abgrenzung eines Bilanzraums durchaus pragmatisch erfolgen. Es ist darauf zu achten, dass die Bilanzgrenzen gekoppelter oder integrierter Bilanzräume eindeutig und nachvollziehbar gestaltet werden. Eine praktikable Bilanzgrenze läge z.B. in einem Prozess an einem eindeutig durch Messtechnik erfassbaren Ressourcenstrom. „Die zweckmäßige Wahl der örtlichen, stofflichen und zeitlichen Bilanzgrenzen hängt maßgeblich von der Fragestellung und den betrachteten Systemen ab“ (VDI 4661 2014, S.28).

Beispiele für Bilanzgrenzen

Die Ressourcennutzung des Fertigungsbetriebes lässt sich durch die Betrachtung 'gate to gate' (Betriebsgrenzen) bilanzieren (siehe Abbildung 3-2). Die Grenzen der Bilanzierung liegen auf dem Werkseingangs- und dem Werksausgangstor. Die innerhalb des Betriebes möglichen Einflüsse sind unkompliziert zu bilanzieren und direkt messbar. Allerdings können Einflüsse auf die außerbetriebliche Bilanz nicht analysiert werden. Die weiß hinterlegten Felder zeigen die betrachteten Ressourcenströme und den betrachteten Prozess.

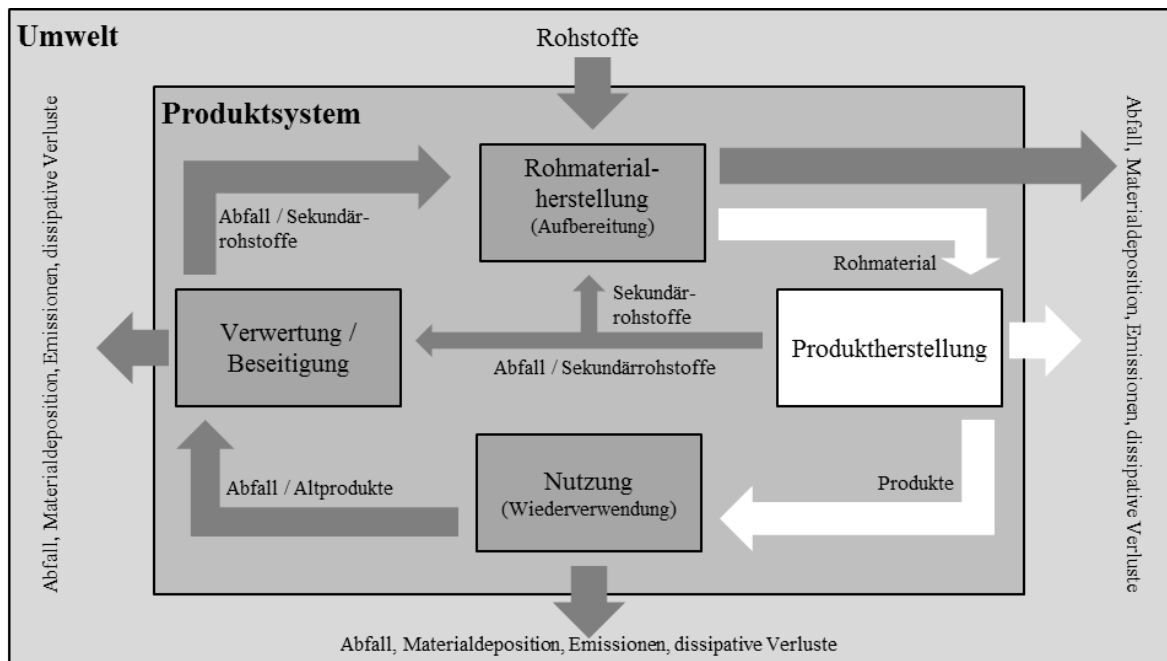


Abbildung 3-2: 'gate to gate' Bilanzierung (VDI 4800 2014, S. 12)

Die innerbetriebliche Bilanzierung ist die am weitesten verbreitete Art der Bilanzierung. Drei individuelle Arten sind am geläufigsten. Bei der Mikroanalyse oder auch Prozesskettenanalyse wird der Produktfluss entsprechend dem Produktionsvorgang in einzelne Prozesse zergliedert und untersucht. Mit Hilfe der energetischen Input-Output-Analyse können „Abschätzungen für ein Produkt oder eine Produktgruppe vorgenommen werden“ (VDI 4600 2012, S.15). „In der Makroanalyse werden Werte für Komponenten oder Produkte dadurch ermittelt, dass vom Produkt her homogene Produktionsbereich hinsichtlich ihrer Input- und Outputströme erfasst werden“ (VDI 4600 2012, S.15).

Etwas weiter gefasst ist die Betrachtung des Bilanzraumes über den gesamten Produktionsprozess, auch als 'cradle to gate' bezeichnet (siehe Abbildung 3-3). In dieser Betrachtung fließen Rohstoffgewinnung, -verarbeitung und -transport, als der Fertigung vorgelagerten Aufwendungen, in die Bilanzierung ein. Dieser Bilanzraum berücksichtigt den für die Herstellung des Produktes notwendigen ganzheitlichen Ressourcenaufwand.

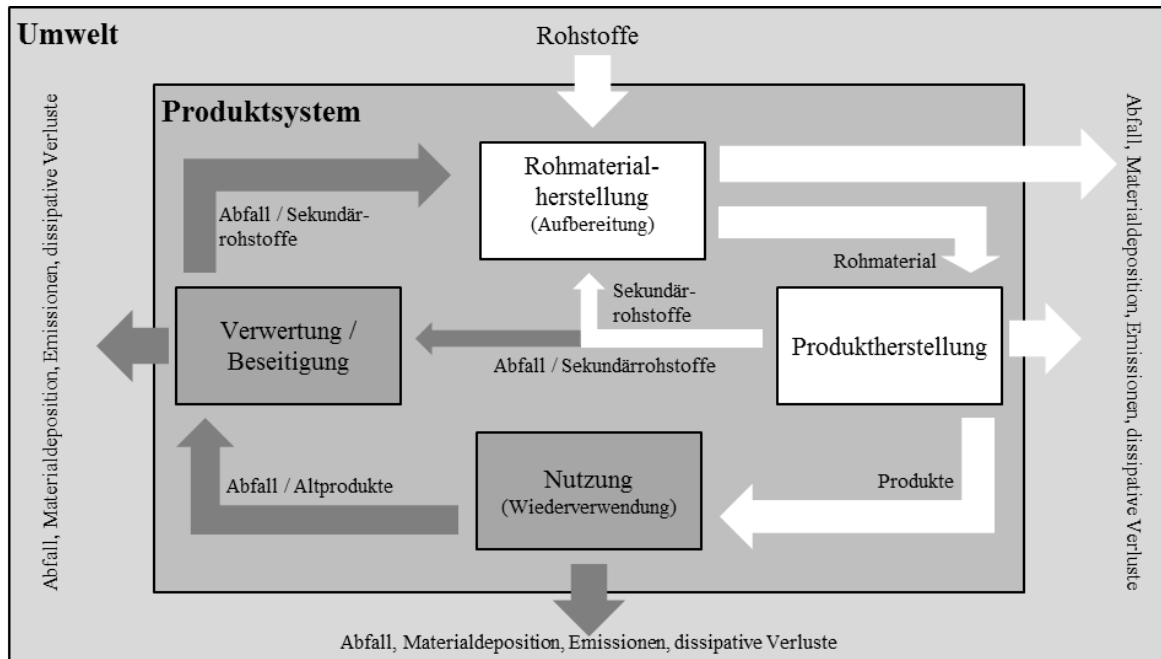


Abbildung 3-3: 'cradle to gate' Bilanzierung (VDI 4800 2014, S.13)

Die Steigerung liegt in der Betrachtung des gesamten Lebenswegs (bezeichnet als 'cradle to grave' oder LCA – Life Cycle Assessment) eines Produktes beginnend mit der Rohstoffgewinnung bis zu dessen Entsorgung (siehe Abbildung 3-4). Diese höchst komplexe Betrachtung berücksichtigt alle Ressourcenaufwendungen entlang des Lebensweges eines Produktes gemäß der Ökobilanzierung nach DIN 14040 (vgl. DIN 14040 2009, S.14).

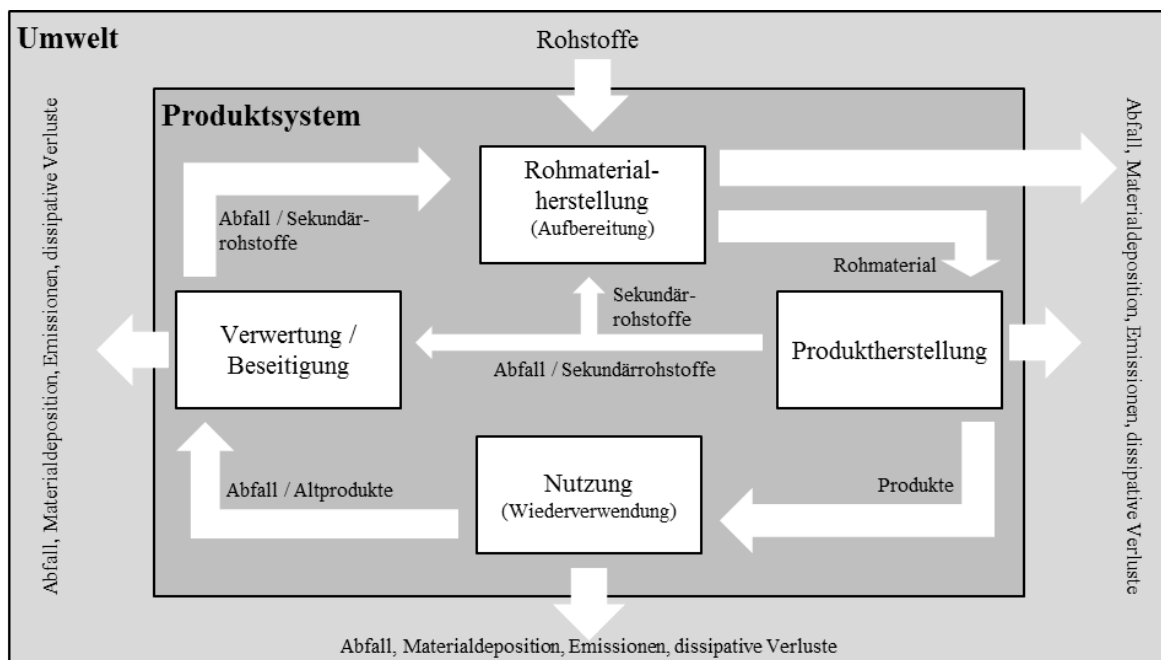


Abbildung 3-4: 'cradle to grave' Bilanzierung (VDI 4800 2014, S.11)

Bilanzzeitraum

Für die Berücksichtigung des Verhaltens von Prozessen muss die Zeitspanne der aufzustellenden Bilanz festgelegt werden. So ist es möglich die stationären oder instationären Betriebsweisen getrennt voneinander oder kombiniert zu bewerten. Das Intervall einer Bilanzierung kann somit sowohl prozessbedingt (Anfahren, Abfahren, Volllast, Wartung, usw.) oder zeitlich (Stunde, Schicht, Tag, Jahr, usw.) festgelegt werden.

Stoffbilanz

Für die Erstellung von Stoffbilanzen ist nach dem Prinzip der Massenerhaltung die Masse oder die Stoffmenge (z.B. die Molekülmasse) zu erfassen. Ist eine Erfassung der Masse nicht möglich, kann diese durch die Zustandsgrößen (Druck, Temperatur, Dichte, etc.) des Stoffstroms und z.B. dessen Volumenstrom errechnet werden. Je nach angedachtem Ziel der Bilanzierung kann die Gesamtmasse oder die Masse einer Komponente erfasst werden. Es ist darauf zu achten, dass alle Stoffströme berücksichtigt werden, die einen Einfluss auf den betrachteten Stoffstrom haben.

Energiebilanz

Die Bilanzierung der Energieströme eines Systems erfolgt auf Basis unterschiedlicher Herangehensweisen. So kann der Wärmestrom durch die Differenz der inneren Energie eines Materialstroms ermittelt werden. Die verrichtete Arbeit kann durch die Differenz der mechanischen Energie eines Systems berechnet werden. Da die Energiearten einem Erhaltungsprinzip folgen, ist in einem Bilanzraum, welcher mehrere wechselwirkende Energiearten beinhaltet, die Art und der Grad dieser Wechselwirkung festzuhalten und für eine geschlossene Bilanzierung zu bestimmen. Der in einem Stoffstrom gebundene Heizwert führt beispielsweise bei einer Verbrennung zu einer Verschiebung der inneren Energie in eine thermisch nutzbare Form.

Weitere Bilanzgrößen

Neben den technisch relevanten Größen können weitere objektive Größen bzgl. der Wirtschaftlichkeit (Geld, Arbeitsaufwand, etc.), umwelttechnischer Aspekte (Emissionen, Abfälle, usw.) und logistischer Betrachtungen (Stückzahl, u.v.m.) bilanziert werden, solange diese zahlenmäßig erfasst werden können.

3.3 Erfassen und Verarbeiten von Daten

Mit der Erfassung von Daten wird ein Ziel (z.B. Energiebilanzierung, Prozessüberwachung, Kostenermittlung, u.v.m.) verfolgt. Daher ist es notwendig, das Ziel jeder Datenerfassung zu formulieren und darauf aufbauend ein systematisches und zweckmäßiges Messkonzept zu erstellen. Das Messkonzept muss die Güte der gewünschten Messungen – im Sinne deren Messgenauigkeit, der Abhängigkeit von Umwelteinflüssen und Taktung – beinhalten. Des Weiteren muss es sowohl die benötigten Messgrößen – direkt physikalisch erfassbar oder über Hilfsgrößen – als auch den Ort der Messungen enthalten. Den prinzipiellen systematischen Ablauf einer Datenerfassung und -verarbeitung in Anlehnung an die VDI 4661 zeigt Abbildung 3-5.

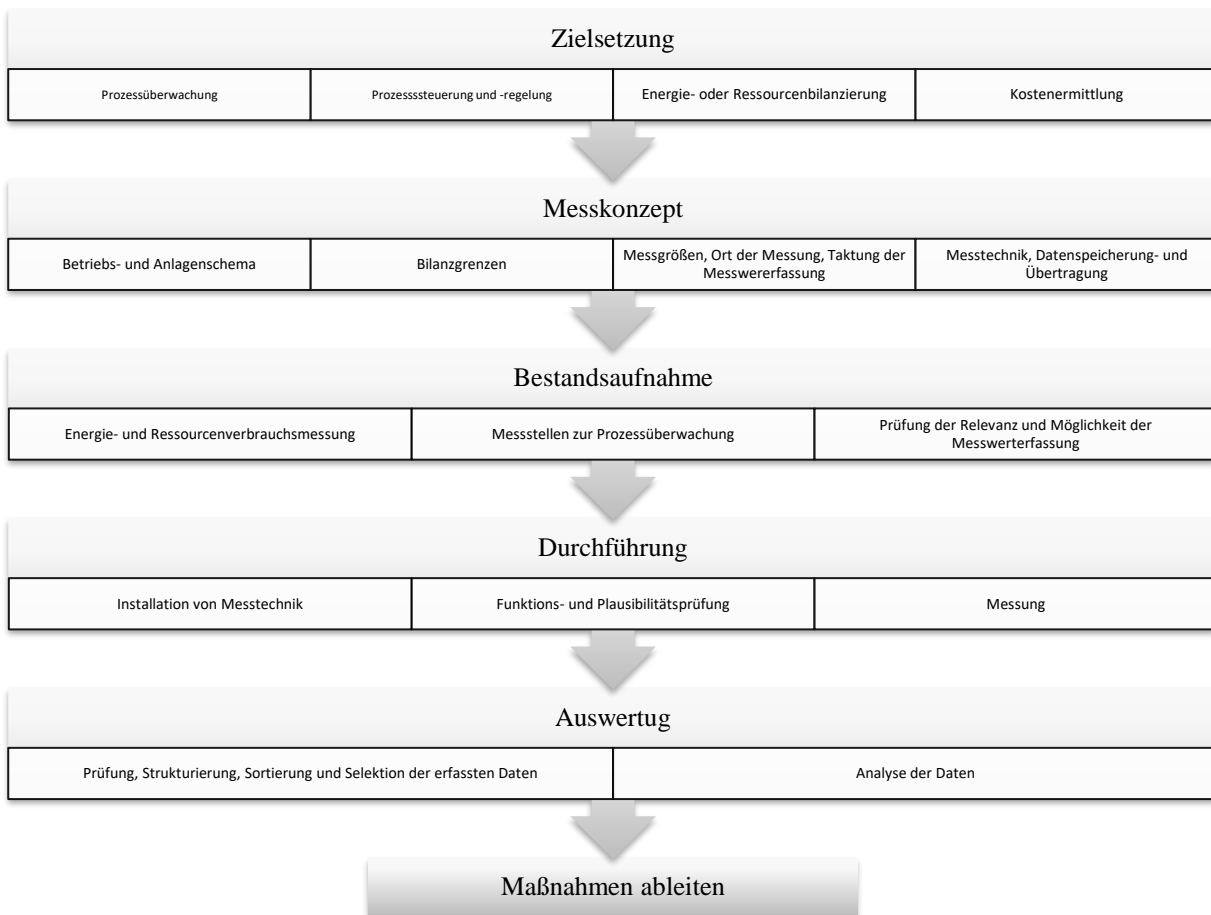


Abbildung 3-5: Systematik zur Datenerfassung und -analyse in Anlehnung an die (VDI 4661 2014, S.46)

Das Erlangen der Prozesskenntnis durch die Erfassung von Messgrößen verbunden mit der Bilanzierung von Energie oder Ressourcen bildet den Grundstein zur Bilanzierung von Kosten eines Prozesses. Die Messung von Prozessparametern ist somit essentiell für die Steigerung der

wirtschaftlichen Effizienz. Dem entgegen halten sich die Argumente, dass Messungen ungenau und teuer seien. Die Anforderungen an die Erfassung von Messgrößen im Hinblick auf deren Erkenntnisgewinn unter Berücksichtigung des spezifischen Einflusses auf die Gesamtbilanz und die dafür notwendige Genauigkeit ist im Einzelfall abzuwägen.

Im Grunde zielt die Erfassung von Messgrößen auf die Dokumentation physikalischer Größen ab, die wiederum für die Bewertung der Prozesse herangezogen werden können. Die minimalen Anforderungen an ein Messkonzept ist die Erfassung aller physikalischen Größen, die für die Bewertung eines Prozesses notwendig sind. Die Erfassung muss in einer zeitlichen Auflösung erfolgen, die es erlaubt die Zustände und Teilschritte des Prozesses in der Bewertung zu berücksichtigen.

3.4 Produktion und Prozess

Das Ziel einer Produktion ist es, Waren herzustellen oder eine physische oder informationstechnische Wertschöpfung durchzuführen. Eine klassische Produktion – die typische Fabrik – erfolgt an einem zentralen Standort. Darüber hinaus finden Wertschöpfungen auch dezentralisiert durch das Auslagern einzelner Produktionsschritte bis hin zur Auslagerung einzelner Waren statt. Ungeachtet der räumlichen oder zeitlichen Verteilung verfolgt eine Produktion einen Produktionsprozess, der wiederum aus mehreren Teilprozessen besteht, die zur Fertigung der Ware und der Wertschöpfung beitragen.

Prozess

„Ein Prozess transformiert Input, häufig über mehrere Stufen, in Output. Je nach Anwendungsbereich sind Transformation, Input und Output unterschiedlich zu interpretieren“ (Schütt et al. 1990, S. 1). In der DIN EN ISO 9001 wird ein Prozess als ein Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben (Input) in Ergebnisse (Output) umwandelt, dargestellt (vgl. DIN 9001 2015, S. 12). Typische Prozesse sind Produktionsprozesse, Transportprozesse, Wertschöpfungsprozesse, Alterungsprozesse und anderweitige Prozesse zur Bereitstellung von Dienstleistungen.

Ein Prozess:

- kann durch seine Prozessparameter beschrieben werden,
- ist zumindest über die Input- und Output-Ströme (Material, Energie und Informationen) sowie durch seine Grenzen definierbar,
- erfüllt einen Zweck (Wertschöpfung, ...),
- hat eine zeitliche Abfolge,
- kann in Teilprozesse unterteilt werden,
- stellt Bedingungen an Material, Energie und Informationen,
- wandelt oder transportiert Energie und/oder Material,

3.5 System und Systemmodell

Ein System ist ein aus mehreren, einzelnen Elementen bestehendes Ganzes. Im technischen Sinn ist es eine Gesamtheit mehrerer aufeinander aufbauender oder wechselwirkender Einheiten, die als sinn- oder zweckgebundene Einheit angesehen werden können. Jedes Element erhält u.U. seine Bedeutung erst durch das Zusammenwirken mit anderen Elementen des Systems. Daher können die einzelnen Elemente eines Systems nur in der Gesamtheit betrachtet und analysiert werden. Diese Gesamtheit kann daher gegenüber der Umwelt abgegrenzt werden.

Ein System ist eine systematische und strukturierte Ganzheit, die einen Ausschnitt aus der realen Welt darstellt. Jedes System ist durch dessen Grenzen definiert, so dass festgestellt werden kann, welche Objekte zu einem System gehören und welche nicht.

Reale Systeme sind derart komplex, dass es notwendig ist, die Realität in Modellen abzubilden. Dazu müssen zunächst alle an dem zu betrachtenden System beteiligten Elemente abstrakt und losgelöst von einer konkreten Situation formal erfasst und dargestellt werden. Die Beschreibung der Elemente sowie deren Wechselwirkungen müssen exakt erfolgen. Unzulässige Verallgemeinerungen sind zu vermeiden. Diese Beschreibung und Darstellung muss vollständig erfolgen, so dass kein weiteres Wissen erforderlich ist, als das bereits in dem Modell festgelegte. Das Modell muss es ermöglichen, die festgelegten Eigenschaften und Zusammenhänge in vernünftigen Grenzen einzuhalten. Die Feinheit des Systemmodells bestimmt die Güte sowie Auflösung der Analyse und legt damit die Detailliertheit der möglichen Maßnahmen fest.

3.6 Methodisches Vorgehen und adaptierbare Methoden

Methoden sind fachsprachlich planmäßige und systematische Verfahren zur Erreichung eines Ziels oder auch die bestimmte Art des Handelns. Methodisches Vorgehen kann auch als Problemlösungsprozess bezeichnet werden. Das geplante, systematische und strukturierte Handeln soll vorrangig den Einfluss von Willkür und Zufall oder Unkenntnis über die Einflüsse auf die Lösungsfindung verhindern. Ein solcher Problemlösungsprozess besteht im Grunde aus der Zielsetzung, der Planung, der Durchführung sowie der Kontrolle (vgl. VDI 2221 1993, S. 3).

PDCA

Eine häufig verwendete Abfolge im Bereich der Energieeffizienz ist der PDCA-Zyklus (plan-do-check-act), welcher dem Mathematiker William Edwards Deming (1900 - 1993) zugesprochen wird. Neben den vier Phasen eines Zyklusdurchlaufs – dem Planen (plan), dem Ausführen (do), dem Überprüfen (check) und dem Verbessern (act) – ist angedacht, den zyklischen Prozess erneut zu durchlaufen und somit einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) durchzuführen. Dieser Ablauf ermöglicht es systematisch zur Verbesserung der Effizienz beizutragen und diese Verbesserung im Vergleich zu den vorhergehenden Zuständen des Systems darzustellen (siehe Abbildung 3-6). Der Zyklus wird u.a. in der DIN EN 16247 und der DIN EN ISO 50001 aber auch in Normen bzgl. des Umwelt- oder Qualitätsmanagement verwendet.

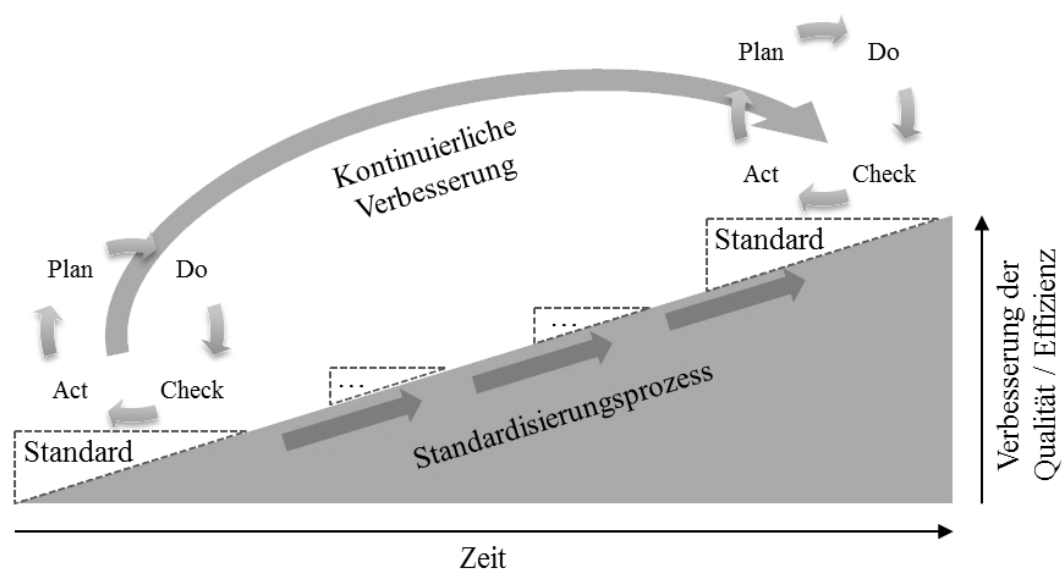


Abbildung 3-6: Kontinuierlicher Verbesserungsprozess unter Anwendung des PDCA-Zyklus

Richtlinie VDI 2221

Die Richtlinie VDI 2211 "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte" beschreibt das methodische Vorgehen in einem Problemlösungsprozess ausgehend von technischen und konstruktiven Aufgabenstellungen über die Lebensphasen des Systems hinweg. Der sich je Lebensphase wiederholende Zyklus besteht aus der Problemanalyse, der Problemformulierung, der Systemanalyse, der Systemanalyse, der Beurteilung sowie der Entscheidung. Die Anwendung der Methode ermöglicht es, die Lebensphasen eines Systems unter Berücksichtigung der jeweiligen Erfordernisse eindeutig zu erreichen und die spezifischen Problemstellungen zu behandeln. Die grafische Darstellung der Methodik nach der VDI 2221 erfolgt in Abbildung 3-7.

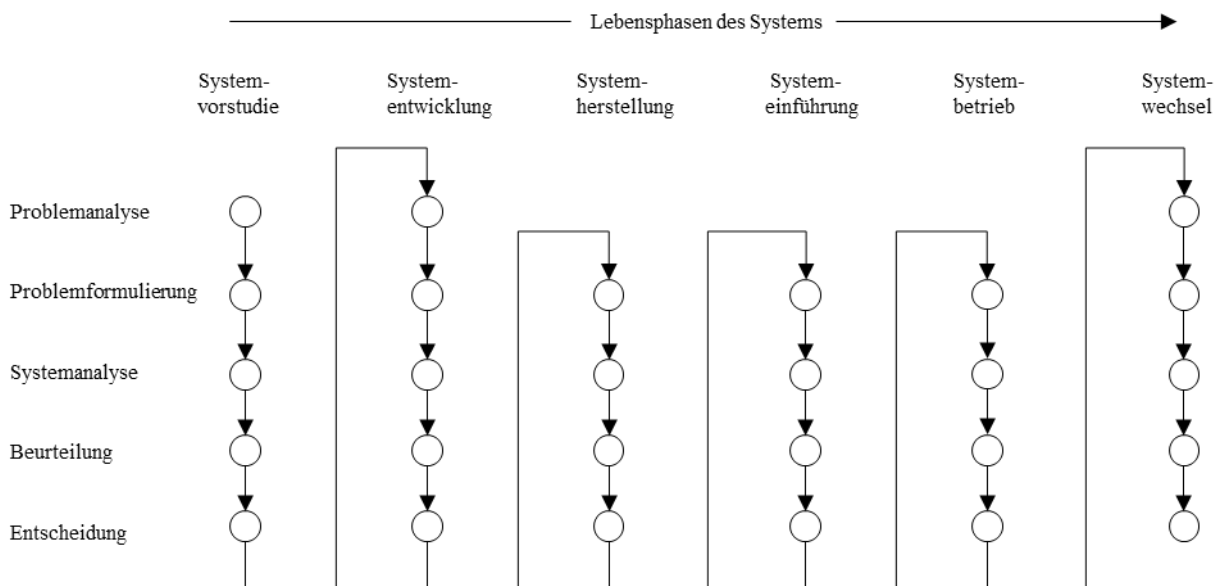


Abbildung 3-7: Systematisches Vorgehen nach der VDI-Richtlinie 2221 (VDI 2221 1993, S. 3: vgl. Blass 1981, Franke 1975 u. Lindemann 1980)

Der in der VDI 2221 dargestellte Ablauf bildet eine ausgezeichnete Grundlage zur Erarbeitung eines systematischen Vorgehens zur Steigerung der Effizienz über die Lebensphasen eines Systems hinweg.

Innovationsstufen

Neben einer kontinuierlichen Verbesserung oder einer zeitlichen Abfolge in Abhängigkeit der Lebensphase kann ein methodisches Handeln ebenfalls nach den Innovationsstufen eines Systems in Hinblick auf das gewünschte Produkt erfolgen. Der zeitliche Ablauf oder die Anzahl

an realisierten Zyklen erhalten eine untergeordnete Bedeutung gegenüber den Innovationsstufen – Produktverbesserung, Redesign-Innovation, Konzeptinnovation und Systeminnovation (vgl. VDI 4800 2014, S. 19) (siehe Abbildung 3-8).

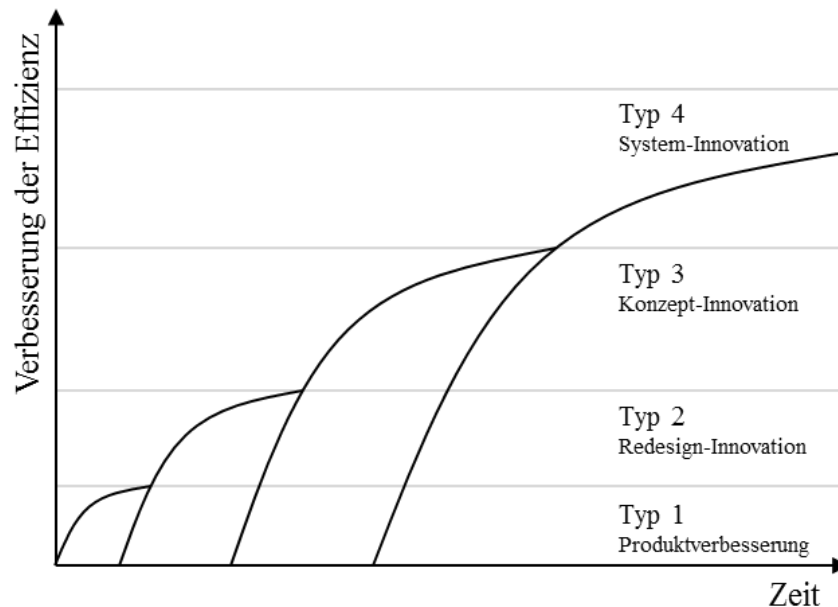


Abbildung 3-8: Methodisches Vorgehen unter Berücksichtigung von Innovationsstufen

Durch die Verbesserung des Produktes (Typ 1) sind klein Verbesserungen, wie die Substitution von Werkstoffen oder der Änderung der Abmessung des Produktes, möglich. Ein Redesign (Typ 2) bedeutet, dass umfangreiche Änderungen an dem Produkt und damit an dem Fertigungsprozess vorgenommen werden. Ein Redesign würde somit alle Produktlebensphasen beeinflussen. Die Konzeptinnovation (Typ 3) stellt das gesamte Konzept des Produktes in Frage. Das Ziel ist es neue Konzepte für das bestehende Produkt oder neue Produkte für den angedachten Nutzen zu initiieren. Eine Systeminnovation (Typ 4) setzt bei der grundlegenden Umgestaltung des Produktionsprozesses und der Infrastruktur an.

3.7 Indikatoren

Zur quantitativen Bestimmung des Ressourceneinsatzes dienen die sogenannten Indikatoren, auch Key Performance Indicator (KPIs) oder Energy Performance Indicator (EnPI) genannt. Sie ermöglichen eine Bewertung individueller Fragestellungen. So können Indikatoren spezifisch für den Bezug natürlicher Ressourcen, die selektive Bewertung des

Energieverbrauchs eines Prozesses oder ganzheitlich zur Bewertung von Ressourcengruppen gebildet werden.

Bei ressourcenübergreifenden Indikatoren oder Indikatoren, die ein komplexes System repräsentieren, besteht der Mangel an Detailkenntnis. So gehen u.U. notwendige Informationen für die grundlegende Bewertung verloren, da sich die Betrachtungen überschneiden. Solche weitgefassten Indikatoren sind z.B. der kumulierte Energieaufwand (KEA) und der Eco-Indicator der Endpoint-Analyse.

Bei der Bewertung eines Systems, in dem die Energie- und Stoffbilanzen eng mit einander verknüpft sind oder in Kuppelproduktionen, ist bei der Gestaltung von Indikatoren auf ein eindeutiges und nachvollziehbares Zurechnungsverfahren zu achten. Darüber hinaus stehen Indikatoren zur Bewertung derartiger Systeme oft in einem Zielkonflikt. Es ist dann im Einzelfall zu prüfen, welches das höherrangige Ziel ist, das verfolgt werden soll. Zudem müssen dann ggf. weitere Indikatoren zur separaten Bewertung der Energie- oder Ressourcengruppen, die in einem Konflikt stehen, gebildet werden.

Trotz der umfangreichen und interdisziplinären Bemühungen geeignete Kennzahlen festzulegen, fehlt es den gängigen Normen und Richtlinien an handhabbaren Kennzahlen. Wesentliche Aspekte sollten die Vergleichbarkeit der Prozesse und die übergreifende Anwendbarkeit der Kennzahl sein, wie es beispielsweise mit dem PhO-Faktor möglich ist (vgl. Girbig 2014).

4 Erweiterung der Methode des PhO

Wie in der Arbeit von Volta beschrieben, setzen Bewertungsmethoden zur Steigerung der Effizienz in der Regel an dem aktuell benötigten Energiebedarf und nicht an den ursächlich für einen Prozess nötigen Aufwand an (vgl. Volta 2014, S. 31).

In Anlehnung an Voltas Definition des physikalischen Optimums soll im folgenden Kapitel seine Methode eine Erweiterung der Definition des physikalischen Optimums und der für die Anwendung der Methode relevanten Kennzahlen erfahren. Im Allgemeinen soll die Methode so dargestellt werden, dass sie einen breiteren Anwenderkreis anspricht und die dafür notwendige individuelle Anwendbarkeit aufweist.

4.1 Erweiterung der Definition des physikalischen Optimums

Das physikalische Optimum beschreibt im Allgemeinen einen idealisierten Referenzprozess. Zu Grunde liegt ein theoretisch optimaler Referenzprozess, der aus den Gesetzmäßigkeiten der Naturwissenschaften oder ingenieurwissenschaftlichen Modellen abgeleitet werden kann sowie durch gesetzliche Grenzwerte oder normierte Qualitäten festgelegt ist.

Um das PhO eines jeden Prozesses festlegen zu können, ist der mit dem Prozess verfolgte Nutzen entscheidend. Als Nutzen wird im weiteren Sinne sowohl der stoffliche, energetische oder informative Nutzen betrachtet. Das PhO muss derartig bestimmt werden, dass es möglich ist, Prozesse, welche den gleichen Nutzen als Ziel haben, unabhängig derer unterschiedlichen Verfahrensweisen, Technologie oder Prozessablauf zu vergleichen. Beispielsweise kann das PhO eines Erwärmungsprozesses gleich dem thermodynamischen Mindestenergieaufwand sein. Das PhO erlaubt allerdings eine umfangreichere und vielseitige Betrachtung der Prozesse. Es integriert sowohl stofflich sowie energetisch den Nutzen und den Aufwand als auch den für die Änderung verantwortlichen Prozess in die Betrachtung. Ist eine detaillierte Betrachtung oder Analyse der Prozesse durch die Verwendung von Modellen oder Interpretation von Naturgesetzen nicht möglich, muss sich der Referenzprozess auf den idealen - explizit für den Prozess messtechnisch erfassbaren - Nutzen beziehen. Als Prozesse gelten Abläufe, deren Ziele einen beschreibbaren Nutzen verfolgen, dazu zählen beispielsweise Geschäftsprozesse oder Wertschöpfungsprozesse. Das PhO eines Prozesses ist immer ultimativ. Jeder

Wandlungsprozess hat somit das Potential physikalisch optimal abzulaufen (siehe Abbildung 4-1).

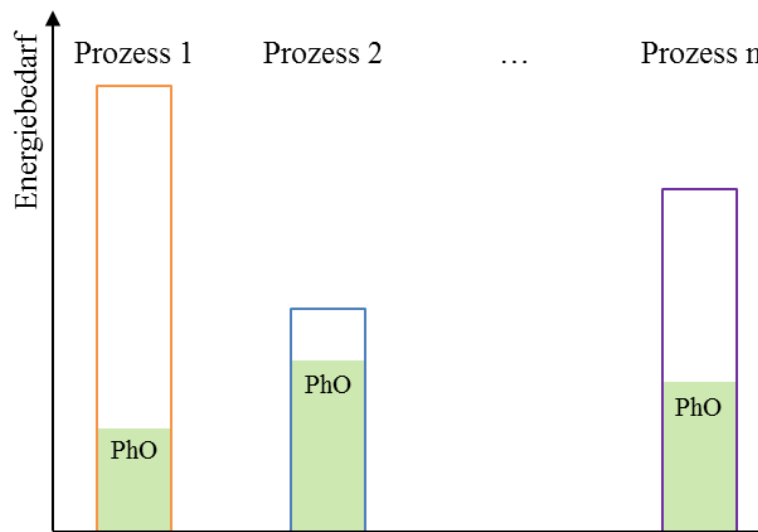


Abbildung 4-1: Darstellung beispielhafter realer und idealer Energiebedarfe unterschiedlicher Prozesse

Der Nutzen des jeweiligen Prozesses legt dessen Betrachtungsweise fest. So kann beispielsweise in einem Versorgungsprozess zur Bereitstellung eines technischen Mediums durch eine Verbrennung maximal die chemisch gebundene Energie des Brennstoffs genutzt werden. Dabei sind die thermodynamischen und feuerungstechnischen Zusammenhänge des Verbrennungsprozesses zu berücksichtigen. Der physikalisch ideale Verbrauch eines Versorgungsprozesses kann somit nicht überschritten werden (siehe Abbildung 4-2 links).

Dem entgegen kann das PhO eines Bedarfsprozesses nicht unterschritten werden, weil beispielsweise auf Grund der Rezeptur eine gewisse Menge des betrachteten Materials in dem Produkt enthalten sein muss, um den gewünschten Nutzen zu gewährleisten (siehe Abbildung 4-2 rechts).

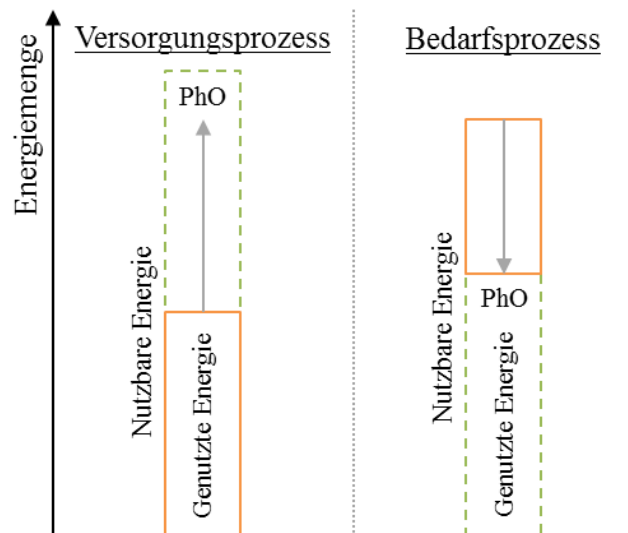


Abbildung 4-2: Gegenüberstellung des physikalischen Optimums eines Verbrauchsprozesses und eines Bedarfsprozesses

Volta (vgl. Volta 2014, S. 33) stellte mit seiner Definition des physikalischen Optimums den idealen Prozess durch die für den Prozess notwendige Menge an Energie oder Ressourcen dar. Für die effiziente Steuerung der Prozesse sowie für die Bewertung des Teillast- bzw. Übergangsverhaltens ist vor allem der momentane Zustand dessen interessant. Die Methode des physikalischen Optimums soll somit um die Betrachtung der physikalisch optimalen Leistung erweitert werden (siehe Abbildung 4-3).

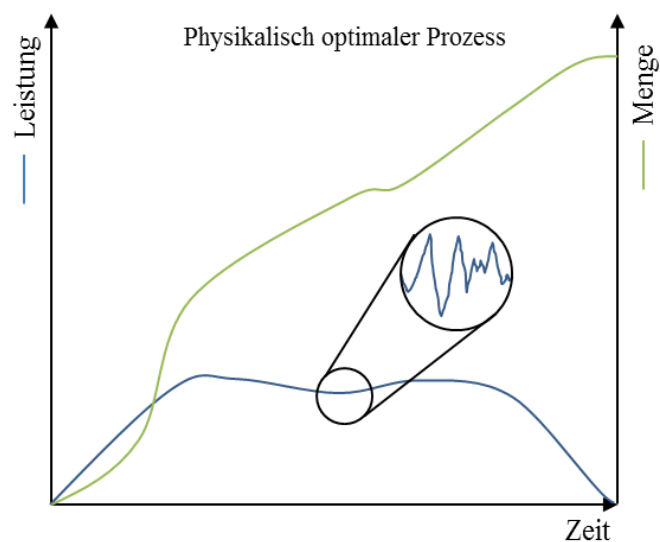


Abbildung 4-3: Die physikalisch optimale Leistung eines Prozesses im Vergleich zu der physikalisch optimalen Menge

Die Erweiterung der Definition des PhO soll vor allem den Nutzen eines Prozesses sowie den Prozessablauf berücksichtigen. Das PhO kann demnach sowohl als Menge an Energie oder Ressource als auch als momentanes Abbild, beispielsweise als ideale Leistung, des Referenzprozesses dargestellt werden.

Unabhängig der Darstellung als momentaner Wert oder als zeitlich gemittelte Menge muss der Bezug des PhO für die Bewertung von Teillastverhalten oder dem Vergleich analoger Prozesse in Bezug auf denselben Referenzprozess erfolgen.

4.2 Der PhO Faktor – Bedarf, Verbrauch und Nutzen

Zu Bewertung des Mehrverbrauchs führte Volta den PhO-Faktor als Quotienten zwischen dem realen Mehrverbrauch eines Prozesses und dem physikalisch idealen Verbrauch ein (vgl. Volta 2014, S. 36), der im Fall eines idealen Prozessverbrauchs mindestens Eins betragen kann. An dem Quotienten, der den idealen Referenzprozess im Nenner verwendet, soll festgehalten werden. Allerdings soll in Bezug auf Kapitel 3.1.3 für solche Prozesse, die Nutzenergie oder Ressourcen anwenden, der Begriff des Bedarfes verwendet werden. Der PhO-Faktor der Bedarfsperspektive (F_{PhO}^B) ist somit der Quotient aus dem realen Bedarf (B) und dem idealen Bedarf (B_{PhO}).

$$F_{PhO}^B = \frac{B}{B_{PhO}} \geq 1 \quad (8)$$

Dermaßen betrachtete Prozesse haben in der Regel einen Bedarf an Energie, beispielsweise die notwendige mechanische Energie eines Förderbandes für den Transport von Produkten oder die aufgewandte Wärme zur Temperierung eines Prozesses. Gleichbedeutend ist der Bedarf an Ressourcen – wie die nötige Wassermenge zur Gewährleistung einer Rezeptur.

Prozesse, die nicht aus der Sicht des Bedarfes von Energie oder Ressourcen sondern aus Sicht der Bereitstellung betrachtet werden, sind laut der Definition in Kapitel 3.1.3 verbrauchende Prozesse. Unter Berücksichtigung der Bildung eines Quotienten mit dem idealen Verbrauch im Nenner, kann der Faktor (F_{PhO}^V) aus realem Verbrauch (V) und idealem Verbrauch (V_{PhO}) maximal Eins betragen.

$$F_{PhO}^V = \frac{V}{V_{PhO}} \leq 1 \quad (9)$$

Typische Prozesse für diese Betrachtungsweise sind Versorgungsprozesse, die Energie verbrauchen, um technische Medien bereitzustellen. Typische verbrauchende Prozesse sind die Bereitstellung von Dampf in einem Dampfkreislauf oder die Bereitstellung von Druckluft.

Ungeachtet der Betrachtungsweise eines Prozesses steht der Nutzen im Verhältnis zu dem dafür notwendigen Aufwand. Daher führen diese beiden Perspektiven zu unterschiedlichen Kennzahlen (siehe Abbildung 4-4). Dabei entspricht der Nutzen eines Prozesses, der einen Bedarf an Energie oder Ressourcen hat, dem physikalisch optimalen Bedarf. Ein verbrauchender Prozess ist dagegen über die physikalisch zur Verfügung stehende Menge an Energie – dem Aufwand – begrenzt. Der jeweilige PhO-Faktor erlaubt es, die Effizienz der Prozesse im Hinblick auf den relevanten Grenzwert und entsprechend der gewählten Betrachtungsweise, zu bewerten.

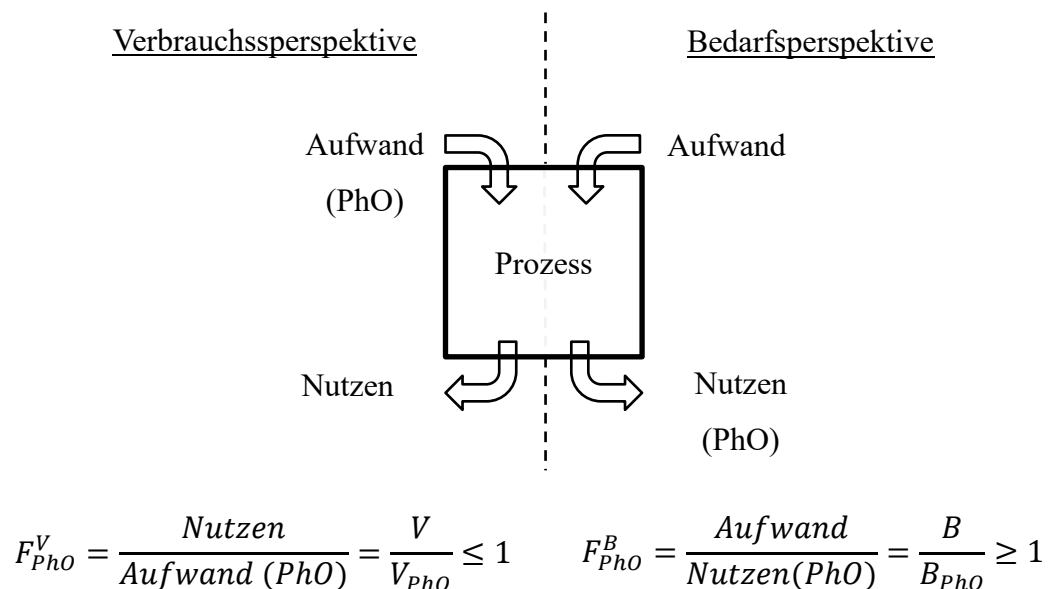


Abbildung 4-4: Wechsel der Betrachtungsweise eines Prozesses

Volta zeigte bereits einen Sonderfall für Prozesse mit Bedarf an Energie (B) auf. Wäre der physikalisch optimale Bedarf (B_{PhO}) Null, würde der PhO-Faktor für den Bedarfsfall (F_{PhO}^B) gegen unendlich streben (vgl. Volta 2014, S 36), z.B. beim Lagern von Gütern.

$$\lim_{B_{PhO} \rightarrow 0} (F_{PhO}^B) = \lim_{B_{PhO} \rightarrow 0} \left(\frac{B}{B_{PhO}} \right) = \infty \quad (10)$$

Analog für einen verbrauchenden Prozess bestünde die Möglichkeit, dass Energie (V_{PhO}) eingesetzt wird ohne dabei einen Nutzen ($V=0$) zu generieren, beispielsweise ein sich nicht

bewegendes Kraftfahrzeug mit laufendem Motor. In diesem Fall würde der PhO-Faktor des Verbrauchsfalls (F_{PhO}^V) gegen Null streben.

$$\lim_{V \rightarrow 0} (F_{PhO}^V) = \lim_{V \rightarrow 0} \left(\frac{V}{V_{PhO}} \right) = 0 \quad (11)$$

Sind sowohl Nutzen als auch Aufwand eines Prozesses Null, wäre der PhO-Faktor mathematisch unbestimmt. Aus technischer Sicht wäre kein Prozess vorhanden, da weder ein Nutzen noch ein Aufwand vorhanden sind.

4.3 Dimensionsbehafteter PhO-Faktor

Die wesentliche Aussagekraft des PhO-Faktors liegt somit in dem Vergleich zwischen dem anvisierten Nutzen eines Prozesses und dem dafür notwendigen Aufwand. Im Detail wird ein Vergleich des Nutzens in Form einer Nutzengröße im Vergleich zu der Aufwandgröße, repräsentativ für den Aufwand hergestellt. Die Nutzen- und Aufwandgrößen sind somit Äquivalente, um den Prozess entsprechend der gewünschten Zielstellung analysieren und bewerten zu können. In realen Prozessen sind die Maßstäbe des Nutzens und des Aufwands u.U. nicht deckungsgleich. Als Beispiel soll ein Trocknungsprozess dienen. Der Nutzen eines Trocknungsprozesses ist die Reduktion der im Produkt enthaltenen Wassermenge. Ein dafür betriebener Aufwand ist der Einsatz von Energie. Dabei kann die Energie je nach Gestaltung des Prozesses sowohl für die mechanische als auch thermische Entwässerung verwendet werden. Zur vergleichenden Bewertung beider Entwässerungsmöglichkeiten ergibt sich also der PhO-Faktor mit der Einheit Kilowattstunde je Kilogramm Wasser.

Des Weiteren kann, je nach Perspektive, der Nutzen oder der Aufwand statt einer physikalischen oder technisch begründeten Grenze einem gesetzlich festgelegten Grenzwert oder Qualität entsprechen. Solche Limitierungen sind beispielsweise umweltrechtliche oder arbeitssicherheitsrelevante Emissionsgrenzen und die Reinigungsqualität.

PhO-Faktoren müssen somit nicht zwangsläufig dimensionslos gestaltet oder durch Umrechnungsfaktoren in eine dimensionslose Form gebracht werden. Die technische Nachvollziehbarkeit der Bedeutung des PhO-Faktors steigt mit dem Bezug auf den bewerteten Prozess und der Verwendung der prozessrelevanten Dimensionen des jeweiligen Nutzens und respektive Aufwandes.

4.4 Der PhO-Leistungsfaktor

Die intervallartige Bewertung von Prozessen ist u.a. durch ökonomische Abrechnungszeiträume, getaktete Produktionsabläufen sowie der Auftragsfertigung geschuldet. Die Bildung eines durchschnittlichen Verbrauchs auf mehr oder weniger lange Zeitintervalle hat u.U. zur Folge, dass An- bzw. Abfahren von Prozessen, Teillastverhalten, Überlasten oder Schwankungen des Regelbetriebes nicht mit dem nötigen Detailgrad berücksichtigt werden. Die Betrachtung und Bewertung separater Prozesszustände ist für die detaillierte Bewertung im Sinne des Vergleiches zwischen Aufwand und Nutzen notwendig (siehe Abbildung 4-5).

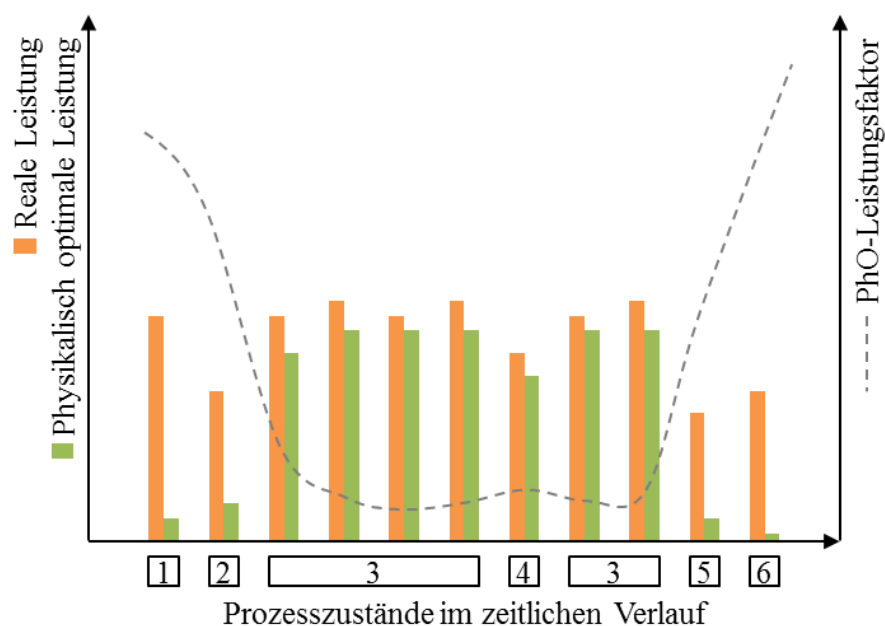


Abbildung 4-5: Verlauf des PhO-Leistungsfaktors in Abhängigkeit der Prozesszustände

Prozesszustand 1 und 2 repräsentieren das Anfahren eines Prozesses, beispielsweise das aufheizen einer Produktionsanlage ohne das gewünschte Produkt zu erzeugen. Der PhO Leistungsfaktor sinkt von diesen ineffizienten Zuständen zu Prozesszustand 3. Dieser ist beispielhaft für einen effizienten Vollastbetrieb. Prozesszustand 4 steht für den weniger effizienten Teillastfall. In Prozesszustand 5 und 6 wird die Produktionsstrecke abgefahren. Die Produktionsanlage muss hier weiter beheizt werden obwohl die produzierte Menge reduziert wird.

Für eine ganzheitlich und kontinuierlich integrierte Bewertung von Prozessen in Echtzeit ist die Auswertung der aktuellen Leistungswerte eines Prozesses durchzuführen. Dazu sind die

momentanen Leistungen, Energie- bzw. Stoffströme zu berücksichtigen. Die Berechnung des PhO-Faktors erfolgt dabei analog zu Abschnitt 4.2 durch die Bildung des Verhältnisses zwischen der realen Leistung und der physikalisch optimalen Leistung:

$$f_{PhO}^B = \frac{b}{b_{PhO}} = \frac{\dot{B}}{\dot{B}_{PhO}} \quad (12)$$

Der PhO-Leistungsfaktor ist das Maß zur Bewertung der aktuellen Effizienz oder des momentanen Prozesszustandes und bietet darüber hinaus die Möglichkeit der Einflussnahme in Echtzeit.

Im mathematischen Sinn entsprechen die momentanen PhO-Leistungsfaktoren zeitlich infinitesimalen Quotienten aus der prozessspezifischen realen und idealen Menge. Die Integration des PhO-Leistungsfaktors über die Zeitspanne des Prozesses führt somit zu der mengen- bzw. arbeitsbezogenen Faktorisierung nach Volta.

$$F_{PhO}^B = \int_{t_1}^{t_2} f_{PhO}^B dt = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{B} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \dot{B}_{PhO} dt} \quad (13)$$

Die Extremwertbetrachtung aus Abschnitt 4.2 gewinnt in der leistungsbezogenen Darstellung der Effizienz eines Prozesses wesentlich an Bedeutung. Durch die konventionelle Bewertung, der Mittelung des Bedarfs durch die Betrachtung eines größeren Zeitraums, gehen infinitesimale Änderungen verloren. Abbildung 4-6 zeigt links exemplarisch einen mengenbezogenen Vergleich des realen Bedarfs eines Prozesses zu dem physikalisch optimalen Bedarf ($F_{PhO}=1$). Es sind zwei mengenbezogene PhO-Faktoren in einem Bezug zu Beginn des Prozesses dargestellt. Der anfangs stark negative Anstieg lässt auf einen ineffizienten Betrieb schließen. Mit fortschreitender Wertschöpfung sinkt der zeitlich gemittelte PhO-Faktor eines Bedarfsprozesses. In der leistungsbezogenen Darstellung (siehe Abbildung 4-6 rechts) deuten Ausschläge über einen gesetzten Grenzwert sofort auf einen ineffizienten Prozessbetrieb. Extreme Ausschläge wie das streben des PhO-Leistungsfaktors gegen unendlich bedeutet, dass Aufwand betrieben wird, ohne einen Nutzen zu generieren. Solch ein Zustand des Prozesses ist zu vermeiden und kann ggf. durch die Verwendung der Bewertung in Echtzeit unterbunden werden.

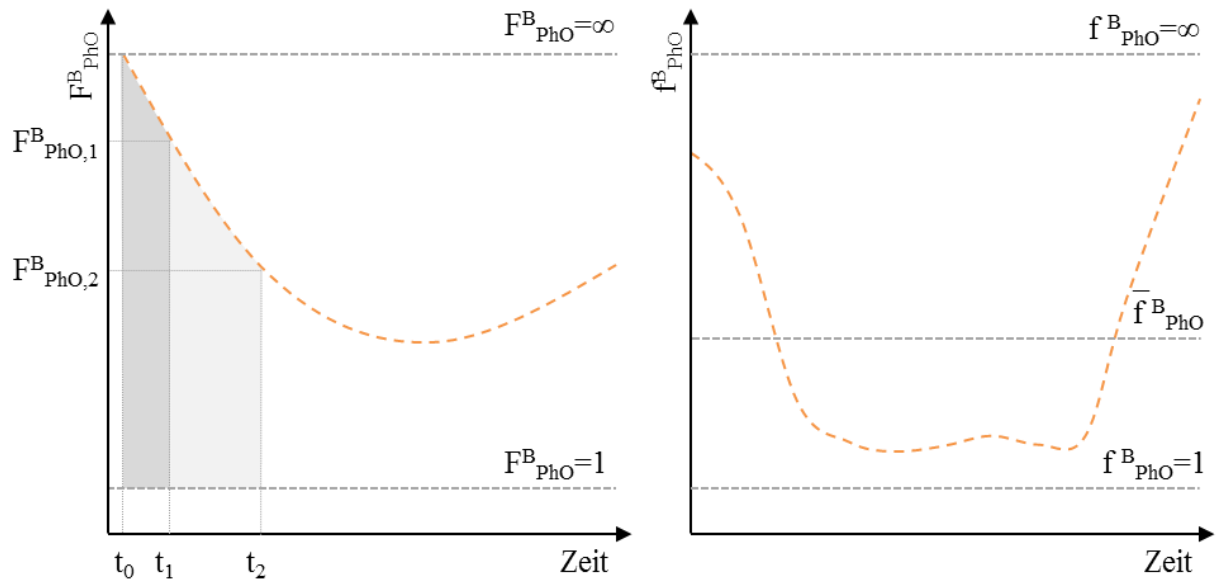


Abbildung 4-6: Arbeits- und leistungsbezogene Darstellung des PhO-Faktors (v.l.n.r)

Der von Volta angewandte normierte Aufwand (vgl. Volta 2014, S.76) berücksichtigt einen gemittelten Zustand des Prozesses, um die Effizienz im Teillast- oder Nennlastfall zu bewerten. Neben dem der Auslastung zugehörigen Aufwand fließt der minimale Aufwand bei einer relativen Produktionsauslastung von 0 % (siehe Abbildung 4-7 links) in den Gesamtaufwand mit ein. Diese Darstellung kann sowohl für die verbrauchsorientierte als auch für die leistungsbezogene Bewertung verwendet werden, solange der Bezug auf stationärem Prozessbetrieb erfolgt. Für eine leistungsbezogene Betrachtung und die Bewertung der Dynamik der Effizienz eignet sich die Darstellung des PhO-Leistungsfaktors über den gesamten Bereich der Auslastung (Abbildung 4-7 rechts). Somit kann jedem Grad der Auslastung eines Prozesses ein spezifischer PhO-Leistungsfaktor zugeordnet werden.

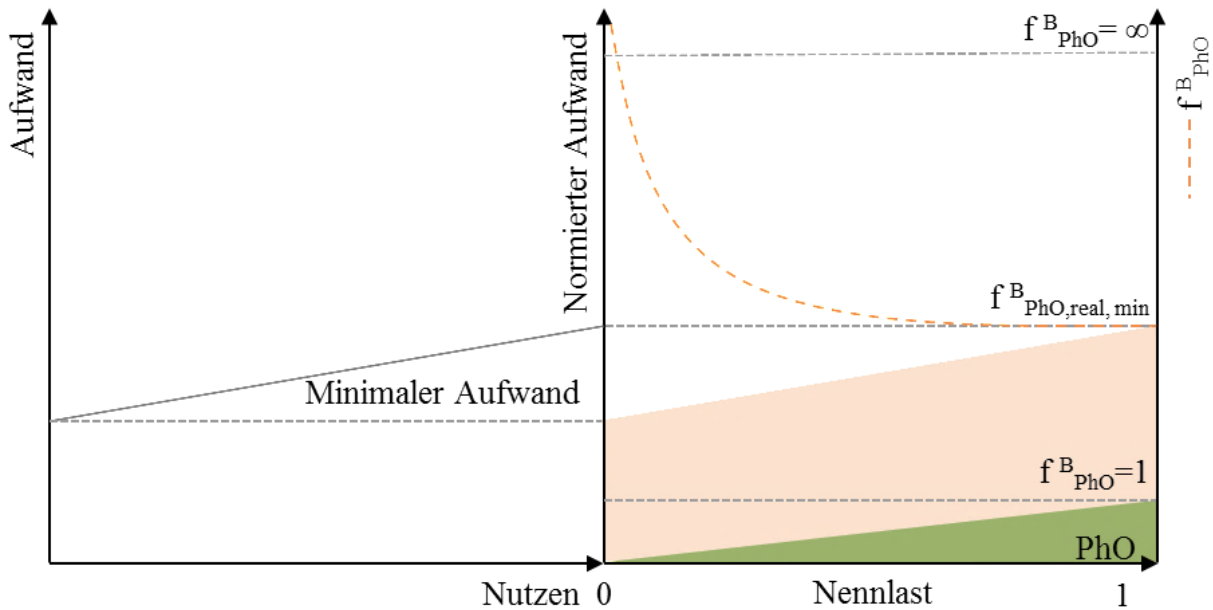


Abbildung 4-7: Darstellung des PhO-Leistungsfaktors in Abhängigkeit der Prozessauslastung

Eine Bewertung des dynamischen Verhaltens eines Systems ist auf Grund des Zusammenspiels der enthaltenen Prozesse und Anlagen, mit deren unterschiedlichen Verhalten über das Spektrum der Auslastung hinweg, individuell durchzuführen. Für die Bewertung der Effizienz von einzelnen Prozessen, unter Berücksichtigung deren Auslastung, ist eine leistungsbezogene Bewertung vorzuziehen. Für die Bewertung von Systemen oder der Bewertung von verbrauchsgebundenen Zeiträumen eignet sich eine Bewertung mittels des linearen Ansatzes nach Volta.

4.5 Trennung der Bewertung von Bestandsprozessen und geplanten Prozessen

Die übergeordnete Systematik nach Volta (vgl. Volta 2014, S. 57) zeigt die Ausrichtung der Methode auf die am häufigsten auftretende Form von Prozessbewertungen – die Bewertungen von Bestandsprozessen. Als Grundlage dafür dienen Messungen und Berechnungen, bis hin zu Simulationen. Das Ziel der Messungen ist es, den realen Zustand der Prozesse zu ermitteln und im Vergleich zu dem durch Berechnungen ermittelten idealen, physikalisch optimalen Zustand darzustellen. Trotz detaillierter Betrachtung der zu bewertenden Prozesse, der Zerlegung in Teilprozesse und Prozessschritte sowie die Separation von Einflüssen auf den Prozess, ist es u.U. nicht möglich, ein Modell für die Ermittlung des idealen physikalischen Referenzprozess aufzustellen oder nicht wirtschaftlich, das Modell durch umfangreiche Messungen zu stützen. Beispielhafte Prozesse sind komplexe Systeme der Energie-, Gebäude- oder Kälteversorgung

sowie der Großchemie. Um dennoch eine Bewertung des gesamten Prozesses im Sinn des PhO zu ermöglichen, ist es ratsam, den Prozesszustand in seiner Unschärfe als quasi effizientesten Zustand (PhO^*) anzunehmen. Dieser kann messtechnisch erfasst werden, auch wenn die Modelle zu ungenau sind, um den Grenzwert rechnerisch zu bestimmen. In diesem Fall ist es sogar möglich, dass der reale Prozess dem idealen entspricht und der PhO-Faktor den Grenzfalleins erreichen kann, obwohl der Prozess verlustbehaftet ist. Daher soll diese Herangehensweise nur in Ausnahmefällen und für möglichst kleine Teilprozesse verfolgt werden. Die messtechnische Erfassung des Prozesses kann wiederum für die Validierung der Prozessmodelle herangezogen werden. Sobald die Erkenntnisse eine Bestimmung des idealen Zustandes ermöglichen, ist der quasi ideale Prozess erneut zu bewerten.

$$PhO^* \cong PhO \quad (14)$$

Für geplante Prozesse stehen in der Regel keine Messwerte zur Verfügung. Ggf. existieren Erfahrungswerte aus vergleichbaren Prozessen oder Messwerte aus ähnlichen oder bestehenden Prozessen, um eine grobe Schätzung des notwendigen Energie- oder Ressourceneinsatzes durchführen zu können. Allerdings liegen geplanten Prozessen Auslegungsparameter, zeitliche Vorgaben, Abläufe und Schnittstellenbeschreibungen zu Grunde. In der modernen Prozess- und Anlagenentwicklung sowie deren Realisierung sind sogar bereits Modelle des angedachten Prozesses vorhanden, die für die Bewertung der Effizienz des Prozesses verwendet werden können.

Die Bestimmung des idealen Referenzprozesses, entweder über die Festlegung eines idealisierten Bestandsprozesses oder die Ermittlung durch Modelle und physikalische oder ingenieurtechnische Vergleichsprozesse, ist essentiell für die ultimative Festlegung des Ziels eines Verbesserungsprozesses. Wird dieser physikalisch optimale Fall nicht eindeutig bestimmt, kann die Steigerung der Effizienz nicht eindeutig und nachvollziehbar zugeordnet werden (siehe Abbildung 4-8).

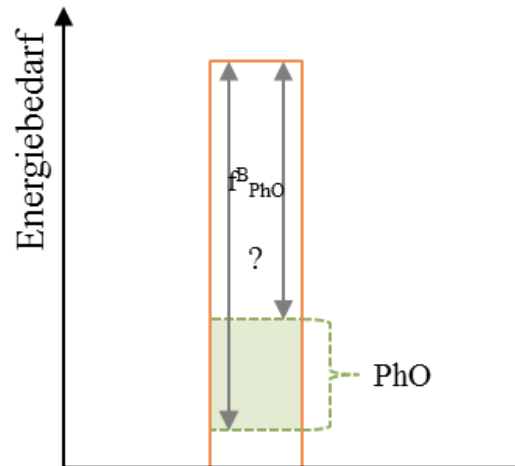


Abbildung 4-8: Der ideale Referenzzustand muss eindeutig festgelegt sein

4.6 Universeller Bezugszustand für eine spezifische Betrachtung

Getrieben durch den Drang nach energetisch effizienteren Prozessen erfolgt die prozessübergreifende Bewertung vorrangig in Bezug auf der für den Prozess notwendigen Primärenergie. Durch Zuhilfenahme des Primärenergiefaktors kann aus der für den Prozess benötigten Menge an Nutzenergie, z.B. elektrischer Strom oder Erdgas, die aufgewendete Primärenergie bestimmt werden (vgl. Volta 2014, S. 29; vgl. Hesselbach 2012). Aus energetischer Sicht lassen sich somit unterschiedliche Energieformen unter Berücksichtigung eines vergleichbaren Bezugspunktes bilanzieren (vgl. Volta 2014, S.63).

Für eine langfristige Realisierung und Kontrolle von effizienzsteigernden Maßnahmen und Ansätzen sind ein allgemeines Verständnis des Prozesses sowie die je nach Organisationseinheit zugehörige spezifische Bewertung zu berücksichtigen. Um Informationsverlust zu verhindern und ineffiziente Umsetzung von Maßnahmen durch Missverständnisse zu vermeiden, sind Prozesse zukünftig sowohl aus ökonomischer, ökologischer und technischer Sicht zu bewerten.

Die Methode des physikalischen Optimums bietet mit der Definition des idealen Referenzprozesses sowie der Festlegung des mit dem Prozess bezweckten Nutzens die Voraussetzung für solch eine vergleichbare Bewertung. Somit kann jedem Prozess der zur Generierung des Nutzens notwendige Aufwand zugeordnet und in Form des PhO-Faktors quantitativ festgehalten werden. Der PhO-Faktor ist demnach keine einheitenlose Kennzahl. Als Beispiel kann ein ökonomischer PhO-Faktor € je Tonne Produkt, ein ökologischer PhO-

Faktor Tonne CO₂ je Tonne Produkt und ein technischer PhO-Faktor kWh je Tonne Produkt sein. Abbildung 4-9 zeigt schematisch das spezifisch betrachtete PhO eines Prozesses.

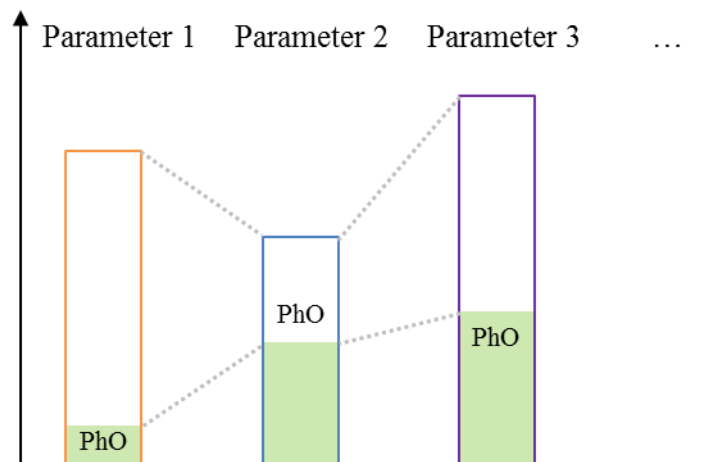


Abbildung 4-9: Spezifische unternehmensübergreifende PhOs mit einheitlichem Bezug auf den Prozess

Durch den einheitlichen Bezug auf das prozessbedingte Optimum unterliegen alle PhO-Faktoren dem selben Bewertungsmaßstab. Die Auswirkungen einer technischen Verbesserung können somit auch unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten bewertet werden. Übliche Verständnis- oder Transkriptionsschwierigkeiten können dadurch vermieden werden.

Allerdings ist der Maßstab der ökologischen und ökonomischen Bewertung zu berücksichtigen und ggf. anzupassen. Es können beispielsweise Veränderungen der Material- oder Energiekosten sowie alternative Energieformen zu einer proportionalen Änderung des spezifischen PhO-Faktors führen, ohne dass eine technische Veränderung durchgeführt wurde. Dennoch bleibt der reale und ideale Prozess das Kernelement für die Bewertung der Effizienz des Prozesses.

5 Grenzwertorientierte Systematik

Mit der Erweiterung der Methode des physikalischen Optimums soll die Bewertung von Gesamtbetriebsweisen unter Berücksichtigung des Bezugs auf das als idealen Referenzpunkt definierte physikalische Optimum ermöglicht werden. Dazu sind die Komplexität, die Spezifik, die Vernetzung und der Ablauf der Prozesse zu erfassen und in die Bewertung der Prozesse zu integrieren. Das dafür notwendige methodische Vorgehen basiert auf einem System von Analysen und Teilschritten, die in ihrer Gesamtheit eine Systematik bilden.

5.1 Systematik zur Bewertung von Gesamtbetriebsweisen

Die Systematik rückt den Prozess in den Vordergrund. Die Betrachtung einer Gesamtbetriebsweise stützt sich somit auf den jeweiligen apparativen Einfluss sowie den Prozessablauf und lässt eine Bewertung der spezifischen Einflüsse auf die Gesamtbetriebsweise in einer Panoramasicht zu (siehe Abbildung 5-1). Abgeleitete Maßnahmen können unter Berücksichtigung ihrer gesamtbetrieblichen Wirkung beurteilt werden.

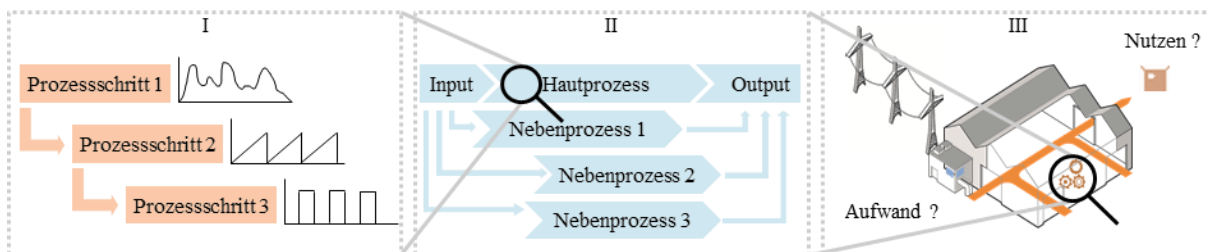


Abbildung 5-1: Stufen der Systematik zur Bewertung von Gesamtbetriebsweisen

Analog der Planungsschritte zur Errichtung einer effizienten Fabrik (vgl. Müller et al. 2009, S.112; vgl. Schenk et al. 2004, Schmigalla 1995 u. Wirth 1989) setzt ein methodischer Ablauf eine Analyse des zu betrachtenden Sachverhalts voraus. Im Rahmen einer Grobanalyse können auf Unternehmensebene die Kernelemente als Grundlage für die systematische Betrachtung des Verbesserungsprozesses in einer rudimentären Form festgehalten werden. Im Wesentlichen gehören dazu der Nutzen und der Aufwand eines Gesamtprozesses sowie die für die Bewertung angedachten Aussagen in Form von Kennzahlen unter Beachtung der mit dem Verbesserungsprozess adressierten Unternehmensteile.

Für die prozessbezogene Analyse muss eine Feinanalyse auf der Ebene der Prozesse folgen. Diese Analyse muss den Zustand und das Zusammenspiel aller für die Bewertung relevanten Prozesse berücksichtigen. Die Prozessanalyse muss darstellen, ob Prozesse aus der Bedarfsperspektive oder der Verbrauchsperspektive an dem Prozesssystem beteiligt und wie Prozesse durch Kopplungen vernetzt sind. Als Bestandteil von Prozessen oder zur Realisierung einzelner Prozesse dienen die Anlagentechnik und die Apparate. Vergleichend zu Blesl et al. (vgl. Blesl et al. 2013, S.24) schließt an die Prozessanalyse die Feinanalyse auf Maschinen- bzw. Anlagenebene an. Dazu ist der Bestand der apparatetechnischen Ausstattung, bereits realisierte Maßnahmen und abgeschlossene Erweiterungen der Anlagentechnik mit aufzunehmen.

Eingebunden in einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess z.B. nach dem Schema Plan-Do-Check-Act (PDCA) erfolgt die Bewertung identifizierter Maßnahmen. Dabei findet der Einfluss auf die Gesamtbetriebsweise und die durch Vernetzung betroffenen Prozesse mit Bezug auf den idealen Referenzprozess Beachtung. Für die Planung, Realisierung sowie die Bewertung und Kontrolle der Wirksamkeit realisierter Maßnahmen werden individuell geeignete PhO-Faktoren angewendet.

Im Folgenden werden die für die Bewertung relevanten Systembausteine oder Werkzeuge als Bestandteil der Methode zu Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz unter Verwendung eines physikalisch begründeten Referenzpunktes dargestellt.

5.2 Die Anwendung der Methode setzt System- und Prozessmodelle voraus

Die modellhafte Darstellung der systemischen Zusammenhänge eines realen Prozesses oder eines Systems von Prozessen ist Grundvoraussetzung für eine ganzheitliche Betrachtung und Bewertung der Effizienz eines Unternehmens. Als eine grundlegende Form eines Systems dient das Beispiel in Abbildung 5-2.

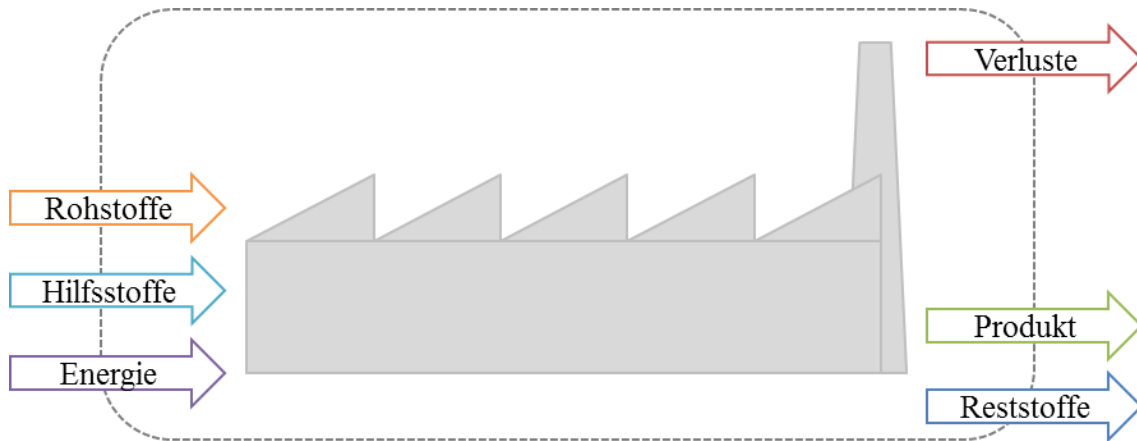


Abbildung 5-2: Stark vereinfachtes Systemmodell einer Fabrik

Sehr vereinfacht besteht das System einer Fabrik aus Inputs in das System, einer Verarbeitung oder Behandlung innerhalb des Systems und Outputs aus dem System. Eine Bewertung der Effizienz durch den Vergleich der bekannten Größen ist möglich. Die Ergründung der Ursachen für Ineffizienzen ist allerdings nur möglich, wenn das Systemmodell mit der erforderlichen Detailtiefe, in der Regel die Prozessebene, betrachtet wird.

Die Basis der Verfeinerung des Modells liegt in der Benennung der am System beteiligten Elemente, Ressourcen, Ressourcenströme, Haupt- und Nebenprozesse und deren Verbindungen innerhalb des Systems. Ein Energie- oder Ressourcenkataster ist ein geeignetes Mittel, um die umfangreichen Informationen strukturiert festzuhalten. Die Darstellung kann in Form eines Prozessablaufes, eines Lageplans und/oder eines Energie- oder Ressourcenplans erfolgen. In der nächsten Detailstufe muss der Energie-/Ressourcenbezug, ggf. die Wandlung und Verteilung von Energie, der Verbrauch von Energie, der Bedarf an Energie oder Edukten, die Rückgewinnung von Energie oder das Recycling von Ressourcen sowie Abfallströme enthalten sein. Abbildung 5-3 zeigt exemplarisch die Darstellung innerbetrieblicher Energieflüsse.

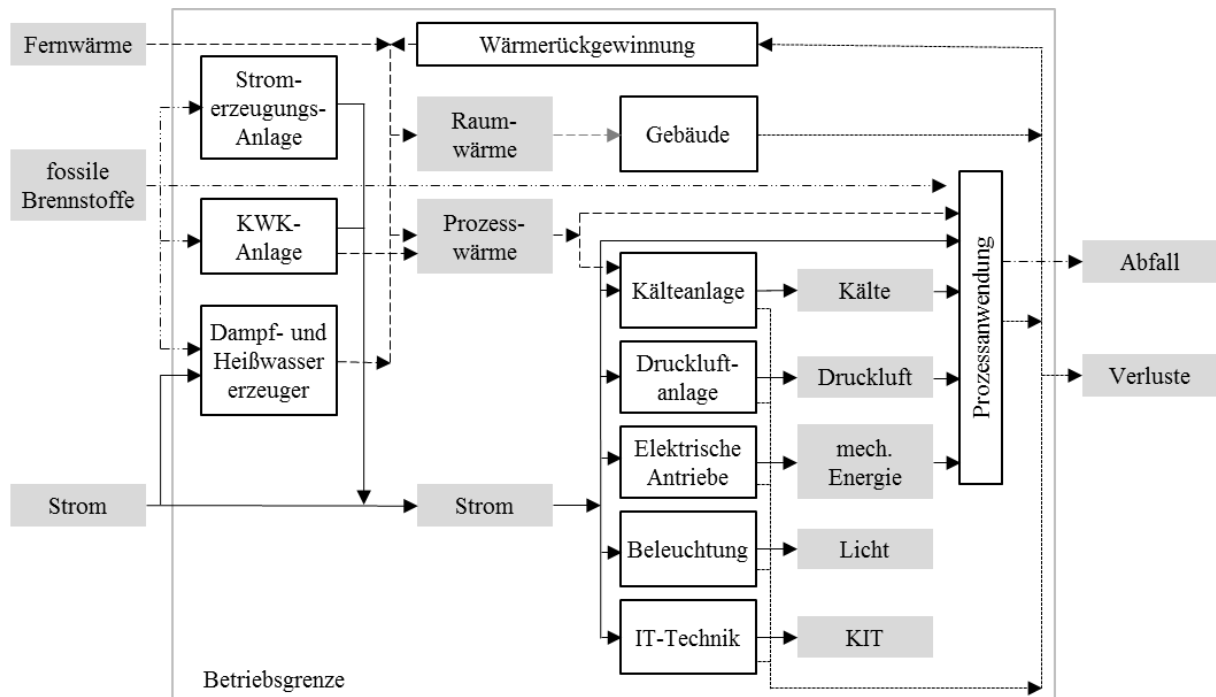


Abbildung 5-3: Beispiel innerbetrieblicher Energieflüsse in Anlehnung an die Darstellung nach Schmid (vgl. Schmid 2004, S.105)

Auf Basis dieser innerbetrieblichen Energieflüsse und ihren dadurch verbundenen Komponenten kann eine kompakte Übersicht in Form einer Energiewandlungsmatrix über die an den Prozessen beteiligten Energieformen und der Art der Energiewandlung erstellt werden. Für Ressourcen- und Informationsflüsse kann ebenfalls je eine Matrix erarbeitet werden. Ziel dieser Betrachtungen ist es, den Eingangs- und Ausgangsströmen der Komponenten den jeweiligen prozessrelevanten Nutzen sowie den dafür notwendigen Aufwand in groben Zügen zuzuordnen (siehe Abbildung 5-4).

Information		Nutzen					
Ressource		Nutzen					
Energie		Nutzen					
		Mechanische Energie	Thermische Energie	Strahlungsenergie	Elektrische Energie	Chemische Energie	Nukleare Energie
Aufwand	Mechanische Energie	Getriebe	Bremse	Synchrotronstrahlung	Generator	-	-
	Thermische Energie	Dampfturbine	Wärmeübertrager	Schwarzer Strahler	Thermoelement	Hochofen	Supernova
	Strahlungsenergie	Radiometer	Solar Kollektor	Nichtlineare Optik	Solarzelle	Photosynthese	Kernphotoeffekt
	Elektrische Energie	Elektromotor	Elektroherd	Blitz	Transformator	Akkumulator	-
	Chemische Energie	Muskel	Verbrennung	Glühwürmchen	Brennstoffzelle	Kohlevergasung	-
	Nukleare Energie	Atombombe	Kernreaktor	Gammastrahlen	Radionuklidbatterie	Radiolyse	Brutreaktor

Abbildung 5-4: Beispielhafte Wandlungsmatrix für Energie, Ressource und Information

Es folgt eine Spezifizierung der Bestandteile des Systemmodells, um apparate- oder prozessbedingte Zusammenhänge und Informationen zu erarbeiten. Die Parameter der installierten Anlagentechnik, die Bedingungen und sicherheitsrelevanten Grenzwerte der Prozesse und/oder die Anschlussleistung seitens der Energieversorgung können dazu in ein Energie- und Ressourcenflussbild integriert werden. Abbildung 5-5 zeigt den Teilauszug aus einem solchen Flussbild, welches die Grundlage für die Erarbeitung der Zusammenhänge zwischen Apparatetechnik und Prozessgrößen verwendet werden kann.

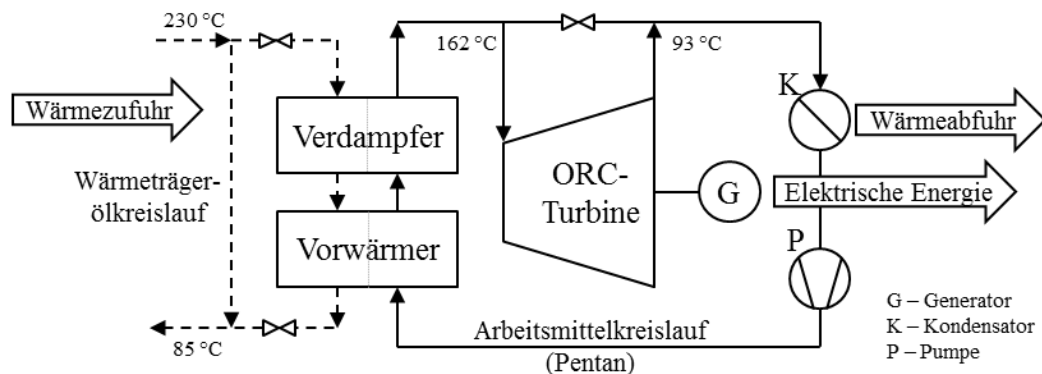


Abbildung 5-5: Detaillierte Prozessbetrachtung mit Hilfe eines Energie- und Ressourcenflussbildes

(Blesl et al. 2013, S.115)

Das gezeigte Bild stellt in groben Zügen einen Zusammenhang zwischen der in einem ORC-Prozess genutzten Wärme eines Ölkreislaufes und der generierten elektrischen Energie sowie der erforderlichen Wärmeabfuhr des Arbeitsmittelkreislaufes her. Es bildet die Grundlage für das weitere Vorgehen. Als wesentlicher Bestandteil für die Betrachtung der Gesamtbetriebsweise ist eine detaillierte Analyse der beteiligten Prozesse erforderlich. Dazu sind ein oder mehrere Prozessmodelle zu erstellen, welche je nach Datengrundlage und Wissensstand aus u.a. verfahrenstechnischer, fertigungstechnischer, energietechnischer oder apparatetechnischer Perspektive einen funktionalen Zusammenhang und zeitlichen Ablauf der Prozessschritte bilden. Nur auf Basis einer detaillierten Betrachtung des Prozesses können der jeweilige prozessspezifische Nutzen und Aufwand definiert und ermittelt werden.

Bei der Stückgutfertigung können Prozessschritte beispielsweise die Grundoperationen der Fertigungstechnik – Urformen, Umformen, Fügen, Trennen und Behandeln – sein und deren Ablauf entlang der Wertschöpfung dargestellt werden (siehe Abbildung 5-6).

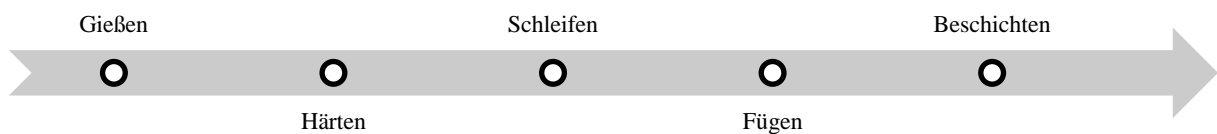


Abbildung 5-6: Exemplarische Prozessschritte eines Prozessablaufes in der Stückgutfertigung

Ein auf Basis verfahrenstechnischer Betrachtung zu erstellendes Prozessmodell kann auf den Grundoperationen der Verfahrenstechnik, der Änderung der Stoffeigenschaften (Zerkleinern, Kühlen, Trocknen, usw.), der Änderung der Stoffzusammensetzung (Mischen, Filtration, Destillation, usw.) und der Änderung der Stoffart (Oxidation, Hydrierung, Polymerisation, usw.) beruhen. Dabei treten sie in realen Prozessen in der Regel in Kombinationen auf oder können räumlich nicht getrennt werden. Dennoch gilt es, die Prozessschritte, deren Bedingungen oder Grenzen und deren Reihenfolge in einem Prozessablauf darzustellen (siehe Abbildung 5-7).

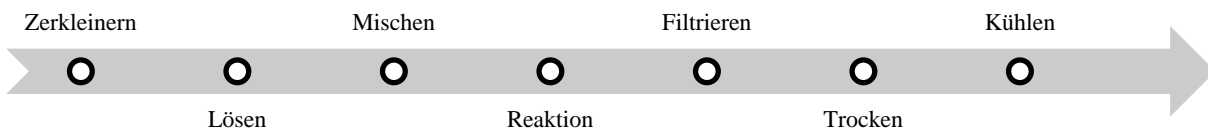


Abbildung 5-7: Exemplarische Prozessschritte eines Prozessablaufes in der Verfahrenstechnik

Die Energietechnik gilt als interdisziplinäres Fachgebiet der Ingenieurwissenschaften mit zahlreichen Verbindungen zu Nachbargebieten. Damit unterliegen energietechnische Prozesse auch den Grenzen der Physik, Chemie und Biologie. Das Ziel aller Bestrebungen der Energietechnik liegt darin, die benötigte Nutzenergie möglichst effizient bereitzustellen oder die zur Verfügung stehende Energie möglichst verlustfrei zu nutzen. Zur Strukturierung energietechnischer Prozesse stehen somit die Grundoperationen Transport und Wandlung von Energie zur Verfügung. Ein typischer Vorgang ist die Bereitstellung von Prozesswärme eines Produktionsstandortes (siehe Abbildung 5-8).

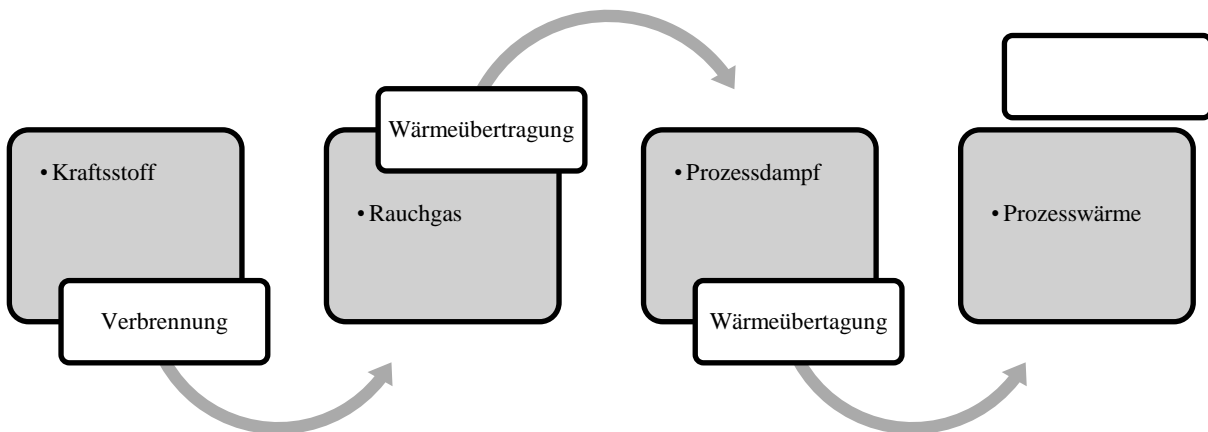


Abbildung 5-8: Exemplarische Prozessschritte eines Prozessablaufes in der Energietechnik

Die Darstellung der Systemmodelle muss um einen nachvollziehbaren zeitlichen Ablauf, die Verknüpfung und die energetischen sowie die stofflichen Niveaus der daran beteiligten Medien der Teilprozesse und Prozessschritte erweitert werden. Modelle müssen alle für die Bewertung relevanten Größen, Gesetze, Methoden und Ansätze beschreiben. Sowohl der reale Ablauf als auch der ideale Ablauf der Prozesse müssen abbildbar sein.

Nur mit einem umfassenden Verständnis der Prozesse und deren Gesamtheit in einem System unter sinnvoller Betrachtungsweise kann die energetische und stoffliche Effizienz ganzheitlich und langfristig bewertet, analysiert und zukunftsweisend geplant werden.

5.3 Die Anwendung der Methode setzt eine Bilanzierung voraus

Bilden das Systemmodell und die Prozessmodelle eine Grundlage für das Verständnis der Prozessabläufe und funktionalen Zusammenhänge, so dient die Bilanzierung eines Systems oder Prozesses der quantitativen Erfassung aller Input- und Outputströme und bildet somit die Basis für die Bewertung der Effizienz. Die Bilanzierung bestehender und geplanter Prozesse ist vergleichbar. Dabei kann ein Systemmodell oder ein Prozessmodell zur Festlegung des Bilanzraumes herangezogen werden.

Eine Bilanzierung erfolgt prinzipiell durch das Erfassen aller Einflüsse auf den betrachteten Bilanzraum. Im Allgemeinen können nur zählbare Mengen (X_{BR}) berücksichtigt werden. Beispielsweise sind auf Grund der Massenerhaltung aus verfahrenstechnischer Sicht die Mengen Masse und Stoffteilchen ideal zu kalkulierende Größen. In der Energietechnik wird vorrangig die Menge an Energie und in der Fertigungstechnik die Stückzahl bilanziert. Die zu betrachtende Menge muss in Relation zu einem abgeschlossenen Zeitintervall stehen. In diesem treten Ströme über die Grenzen in den Bilanzraum ein (\dot{X}_{ein}) oder aus (\dot{X}_{aus}). Darüber hinaus wird die Menge durch interne Quellen (\dot{X}_{Quelle}) oder Senken (\dot{X}_{Senke}) verändert. Abbildung 5-9 zeigt schematisch die Grundelemente einer Bilanz.

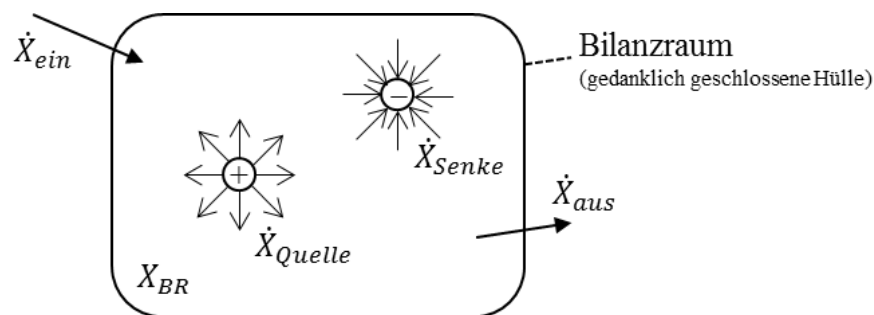


Abbildung 5-9: Schematische Darstellung zur Bilanzierung eines Bilanzraumes

$$\frac{dX_{BR}}{dt} = \sum \dot{X}_{ein} - \sum \dot{X}_{aus} + \sum \dot{X}_{Quelle} - \sum \dot{X}_{Senke} \quad (15)$$

In realen Prozessen sind in der Regel Kombinationen aus mehreren Bilanzen erforderlich. So werden Stoffe transportiert, die stofflichen Eigenschaften verändert und Energie gewandelt. Produktionsprozesse müssen dann sowohl über eine Stoffbilanz als auch über eine Energiebilanz beschrieben werden. Als geeignetes Mittel zur qualitativen und quantitativen Darstellung eignet sich ein Sankey-Diagramm. Abbildung 5-10 zeigt ein solches Diagramm als Energiefließbild verschiedener Energieträger, Energieformen und Niveaus.

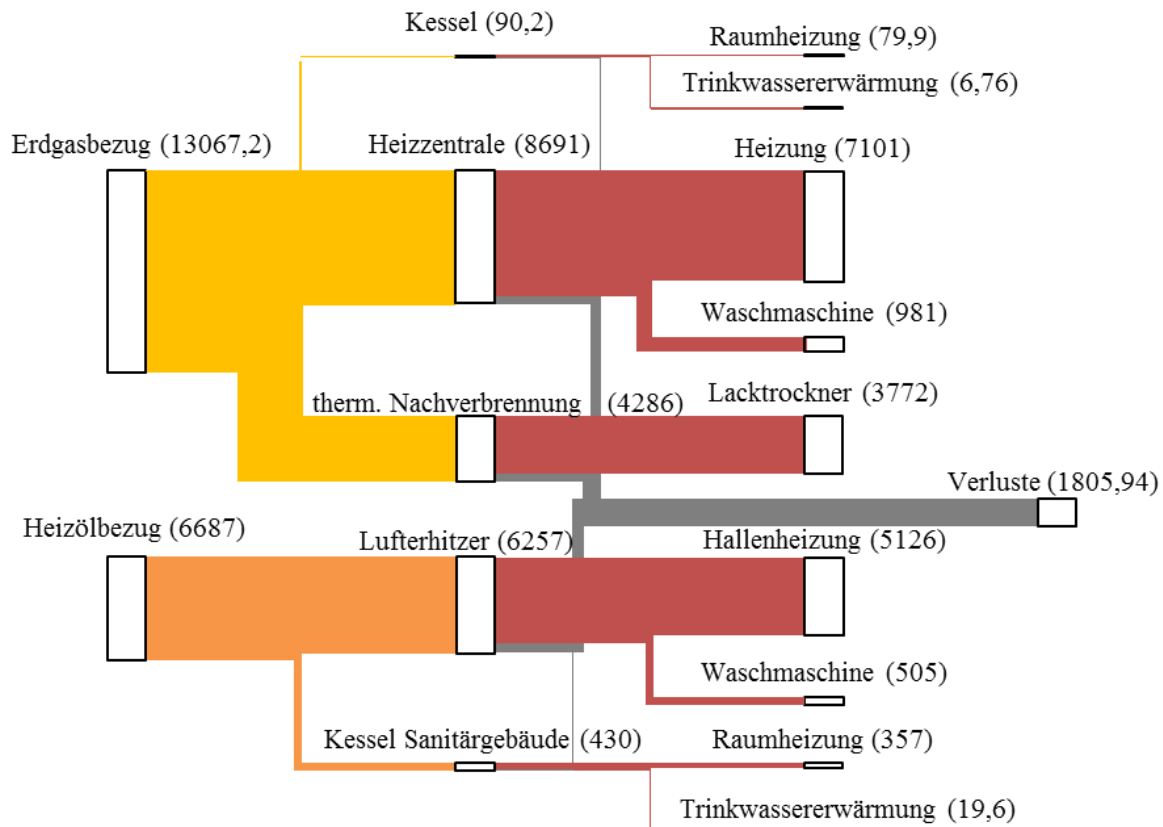


Abbildung 5-10: Sankey-Diagramm: Energiefließbild mit Energieträger, Energieform und Niveau in MWh pro Jahr (Müller et al. 2009, S.267)

Für eine vollständige Beschreibung müssen die Zusammenhänge aller Bilanzen eines Bilanzraumes sinnvoll dargestellt werden. Darüber hinaus müssen bei Bilanzräumen über mehrere Prozesse die Interaktion der Prozesse berücksichtigt und die Bilanzen einzelner Prozesse mit eindeutigen Grenzen zu anderen Bilanzräumen versehen sein. Der mit Hilfe des Prozesses anvisierte Zweck, dessen Qualität und Quantität sowie alle dafür erforderlichen Aufwände und zwangsläufigen Verluste müssen beschrieben und festgehalten sein. Die dafür herangezogenen idealen Größen müssen auch real erfassbar oder über Hilfsgrößen herzuleiten sein.

Die mit solcher Sorgfalt hergeleitete Kalkulation eines Prozesses oder Vielzahl an Bilanzen eines Systems, unter Berücksichtigung der systematischen und strukturellen Zusammenhänge sowie der Beschreibung des Prozessablaufes, bilden die Grundlage zur ganzheitlichen Erfassung der realen Aufwände und des realen Nutzens eines zweckgebundenen Prozesses.

Für einen übersichtlichen Vergleich eignen sich Darstellungen, die den prozessspezifischen Aufwand erkennen lassen. Volta führte dazu die erweiterte Pareto-Analyse (vgl. Volta 2014, S.

60) und die Verlustkaskade (vgl. Volta 2014, S.85) ein. Abbildung 5-11 zeigt eine analoge Darstellung unter Berücksichtigung der Systemstruktur.

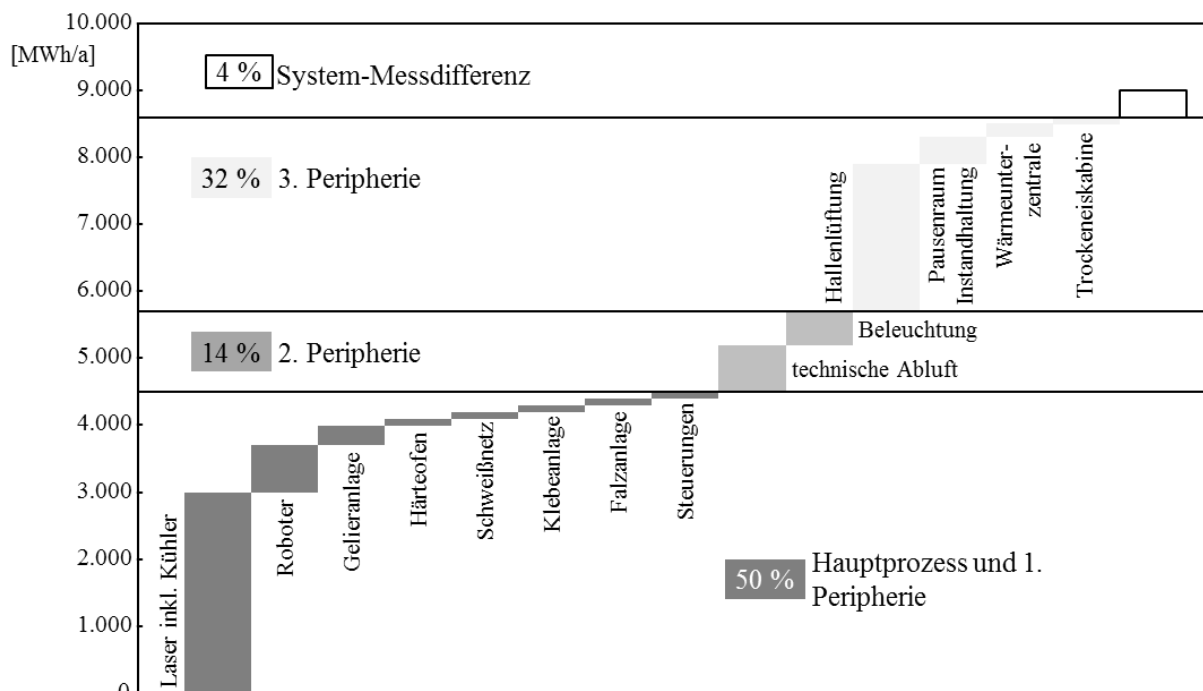


Abbildung 5-11: Systemaufwand-Analyse für den Hauptprozess, erste bis dritte Peripherie und die Messdifferenz der Aufwandserfassung in Anlehnung an (Müller et al. 2009, S.266)

Die unter Verwendung der dargestellten Systematik realisierten Prozess- oder Systemstruktur bildet neben der Erfassung der realen Aufwände die Grundlage für die Ermittlung des idealen Referenzprozesses, dem PhO, jedes Prozesses.

5.4 Entscheidend für Verbesserungen ist die Genauigkeit des Modells

Die größte Schwäche aktueller Bemühungen, die Effizienz von Prozessen zu verbessern, liegt darin, dass die höchstmögliche erreichbare Stufe der Effizienz nicht bekannt ist. Die grenzwertorientierte Analyse auf Basis des PhO soll hierbei Abhilfe schaffen und somit den Vergleich des realen Aufwandes mit dem idealen Aufwand eines Prozesses ermöglichen. Die Festlegung eines idealen Referenzpunktes muss demnach exakt erfolgen. Anderenfalls könnte eine weitere Verschiebung des Grenzwertes im Verlaufe des Verbesserungsprozesses notwendig werden (siehe Abbildung 5-12).

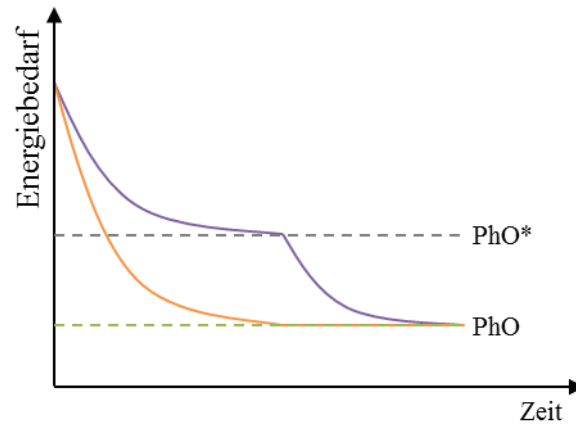


Abbildung 5-12: Das Verbesserungspotential kann nur ermittelt werden, wenn das physikalische Modell des Prozesses exakt ist.

Obwohl Prozessmodelle nur eine idealisierte Betrachtung der realen Prozesse auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten oder ingenieurtechnischer Modelle ermöglichen, sollten diese für die Betrachtung vereinfachten Modelle möglichst genau sein und dem realen Prozess nachempfunden sein. So sollte es das Modell erlauben, den idealen als auch den realen Prozess nachvollziehbar darzustellen.

Mit Hilfe eines Begriffsgraphen (siehe Abbildung 5-13) können anlagen- oder apparatbedingte funktionale und prozessrelevante Zusammenhänge zunächst qualitativ und anschließend quantitativ festgehalten werden. Auf dieser Basis kann das generierte Prozessmodell überprüft und verfeinert werden, bis das Modell den realen und idealen Anforderungen gerecht wird. Der in der Abbildung betrachtete Gesamtnutzungsgrad kann durch andere Zielgrößen, beispielsweise dem physikalisch idealen Verbrauch, ersetzt werden.

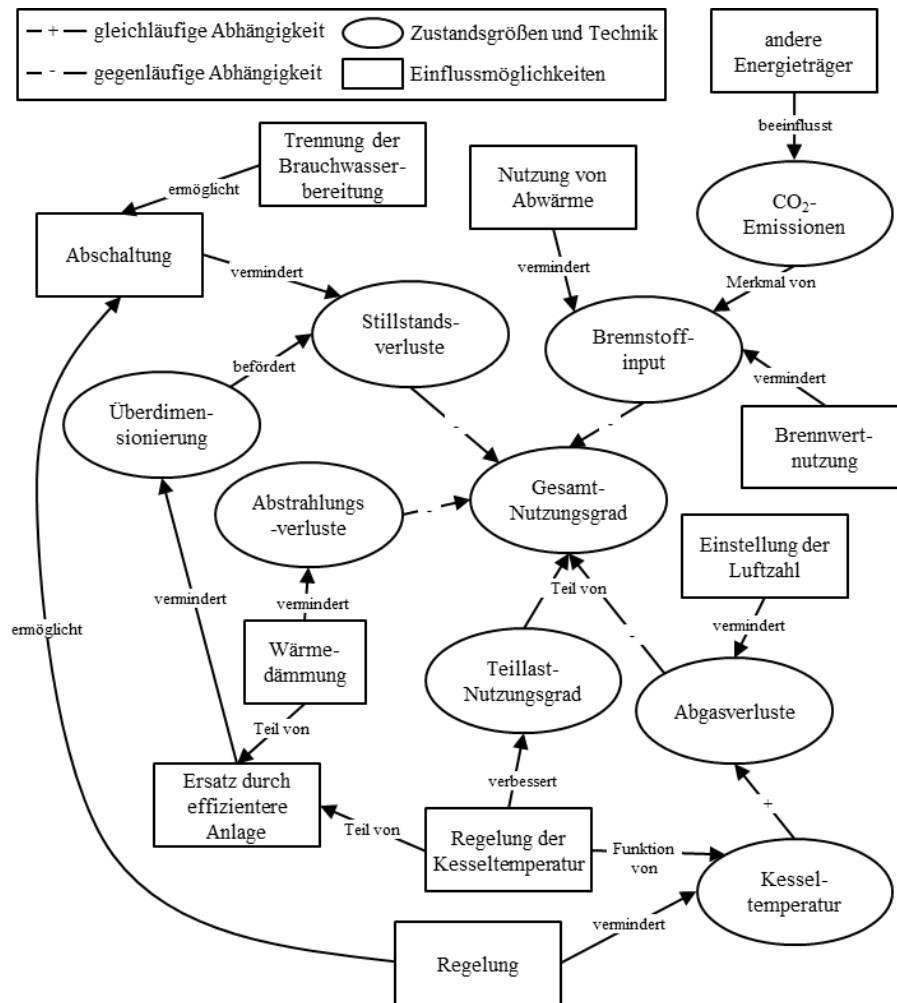


Abbildung 5-13: Begriffsgraph zur Darstellung der Zusammenhänge bei der Wärmeerzeugung durch eine Kesselanlage analog der Darstellung von Schmid (Schmid 2004, S. 245)

Ein simples Modell kann für die Erwärmung von Wasser generiert werden. Somit wäre der Aufwand des idealen Prozesses die notwendige Energie (Q) der gewünschten Menge an Wasser (m) zuzuführen, bis diese Menge die geforderte Temperatur (T_2) erreicht hat.

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (16)$$

Solange die Menge an Wasser, die Wärmekapazität des Wassers für die Prozessbedingungen (c_p) und die Ausgangs- und Endtemperaturen festgelegt und ermittelbar sind, existiert ein sehr exaktes Modell und damit ein eindeutiger Grenzwert für den idealen Referenzprozess. Der zeitliche und räumliche Ablauf des realen Prozesses kann auf das Modell übertragen und der reale Ablauf somit auf Basis des Modells nachempfunden und mit realen Messwerten gestützt werden. Der dargestellte Prozess und das dazugehörige Modell kann

sowohl für die Analyse und Bewertung während der Planung als auch in bestehenden Prozessen herangezogen werden.

Eine Modellierung realer Prozesse basierend auf physikalischen Grundgleichungen ist unter Umständen trotz einer Zerlegung in Teilprozesse nicht möglich. In diesem Fall müssen diese nicht physikalisch erfassbaren Teilprozesse über Annahmen definiert werden. Um den Anforderungen einer Darstellbarkeit des quasi idealen Referenzprozesses und des realen Prozesses gerecht zu werden, eignen sich u.a. Referenzformeln zur Allokation des Ressourceneinsatzes (Paukzstat 2006, S.25). Die Referenzformel ermöglicht beispielsweise die Berechnung eines Endenergiebedarfes auf Basis der Produktionsmenge und einem spezifischen Referenzwert. Der Referenzwert enthält wiederum eine Vielzahl möglicher Einflussfaktoren auf die Effizienz des Prozesses. Solche Beeinflussungen sind u.a. der Zustand und das Alter der Anlage, der Technologiestandard, die Qualität des Produktes. Als Beispiel führt Paukzstat den Referenzwert (REF) für den Brennstoffbedarf (Paukzstat 2006, S. 42) unter Berücksichtigung des Kesselwirkungsgrades (η_K), der Brennstoffqualität ($f_{\text{Qualität}}$) und des Betriebsverhaltens (f_{Betrieb}) auf.

$$REF = \frac{1}{\eta_K - f_{\text{Qualität}} - f_{\text{Betrieb}}} \quad (17)$$

Mit Hilfe des Referenzwertes ist es möglich, die unterschiedlichen Einflüsse auf den realen Bedarf eines Prozesses zu quantifizieren und sich dem optimalen Prozess durch Anpassung des Referenzwertes zu nähern. Übertragen auf die Methodik unter Verwendung eines physikalisch begründeten Referenzpunktes entspräche der ideale Aufwand dem Nutzen und somit dem idealen Aufwand des Prozesses. Der Referenzwert entspräche dem PhO-Faktor

$$Aufwand = Referenzwert (F_{\text{PhO},ref}) \cdot Nutzen(V_{\text{PhO}}) \quad (18)$$

Im Fall nicht modellierbarer Prozesse ließe sich mit Hilfe der in einem Faktor gebündelten Einflussfaktoren von dem realen Verbrauch auf den quasi idealen Verbrauch schließen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Einflussfaktoren in sinnvoller Weise und in zweckmäßigem Verhältnis in den PhO-Referenzfaktor ($F_{\text{PhO},ref}$) einfließen. Diese Vorgehensweise ist im Vergleich zu der physikalisch begründeten Modellierung nur als notwendiges Hilfsmittel zu verwenden und die Ungenauigkeit dieser Vorgehensweise ist zu beachten.

5.5 Die leistungsbezogene Bewertung verbesserte den Prozessablauf

Eine mengenbezogene Bewertung der Prozesse ermöglicht Schlussfolgerungen über die Energie- und Ressourcenaufwendungen dieser für einen festgelegten Zeitraum. Dabei unterliegen sowohl kontinuierliche als auch diskontinuierliche Prozesse Intervallen, verursacht durch deren Prozessabläufe, deren Prozessgrenzen sowie deren Steuerung und Regelung, die einen erheblichen Einfluss auf die momentanen Energie- und Ressourcenaufwendungen haben. Als Beispiel dient die Darstellung in Abbildung 5-14, in der die Lastverläufe eines Prozesses mit drei Lasten dargestellt sind. Die momentanen Gesamtleistungsaufnahmen richten sich nach den Teilleistungen entsprechend des Prozessablaufes.

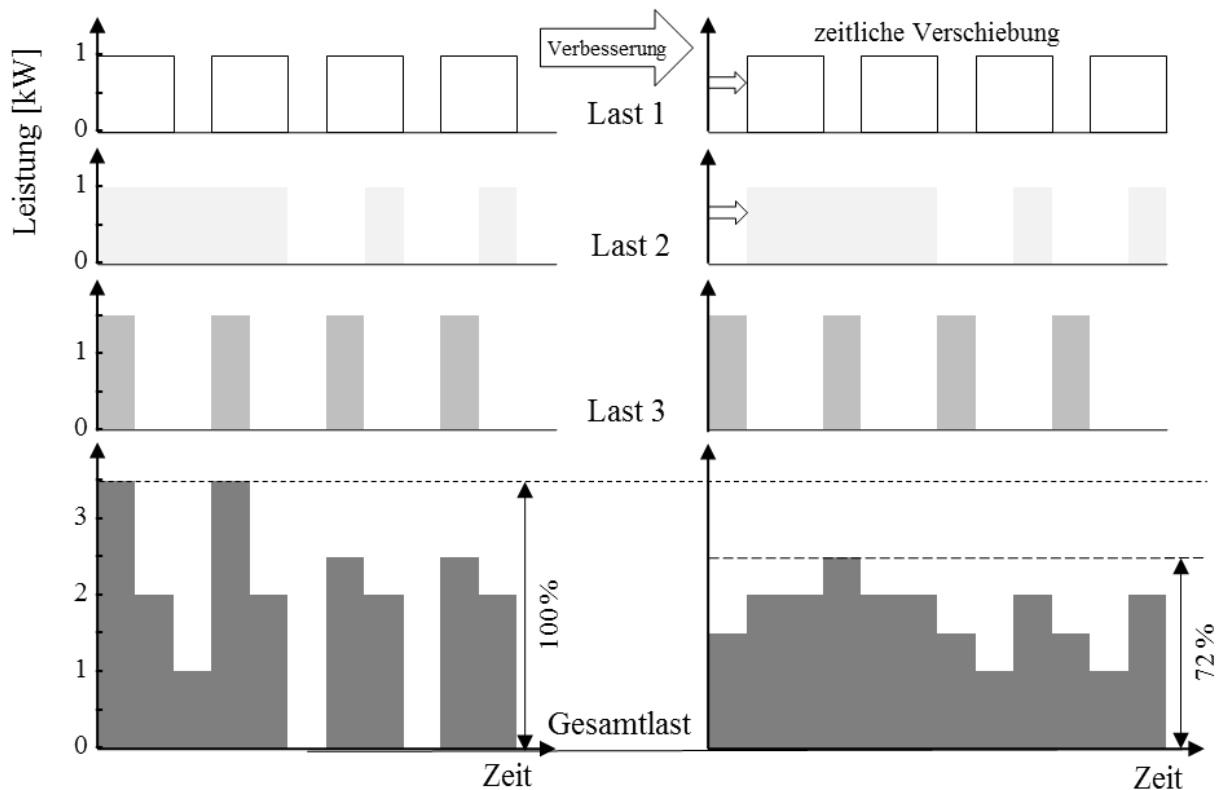


Abbildung 5-14: Verbesserung der Gesamtlast durch zeitliche Verschiebung der Einzellasten in Anlehnung an die Darstellung (vgl. Müller et al. 2009, S.97)

Eine mengenbezogene Auswertung des gesamten Prozesses würde eine Bewertung der Effizienz in Abhängigkeit des Ablaufes mit ausreichender Genauigkeit verhindern. Seitens der Netzbetreiber wächst das Interesse im Hinblick auf die Spitzenlast von Prozessen. Produzenten und Anlagenhersteller sind vor allem bezogen auf die Grenzen der Anlagentechnik an der Auslastung interessiert. Somit führen höhere Netzentgelte oder vorzeitige Wartungen- und

Instandhaltungen zu höheren Produktionskosten, was in Summe ineffiziente Produktionen zur Folge hat.

Die Bewertung der Effizienz von Prozessen sollte somit auch deren Verhalten berücksichtigen und zugleich eine Kontrolle über den Parameter „Effizienz“ ermöglichen. Dazu dienen beispielsweise Lastprofile der Prozesse. Für die Aufnahme solcher Profile ist die Kenntnis über den prozesstechnischen sowie dessen zeitlichen Ablauf essentiell. Die zeitliche Schrittweite der Messwerterfassung (Tag, Stunde, Minute, Sekunde usw.) muss es ermöglichen, den Leistungsverlauf entsprechend des Prozessverhaltens abzubilden. Abbildung 5-15 zeigt das beispielhafte Verhalten einer momentanen Leistungsaufnahme einer Druckluftversorgung in Form einer Jahresganglinie.

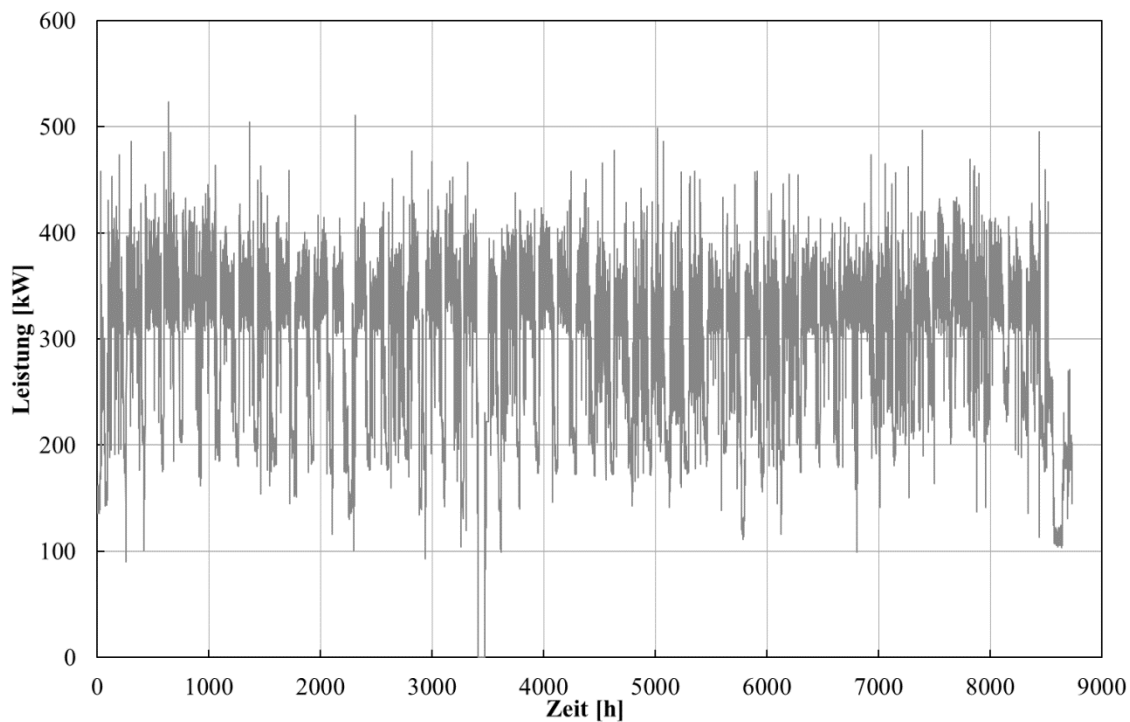


Abbildung 5-15: Jahresganglinie der momentanen Leistungsaufnahme einer Druckluftversorgung

Die Abbildung 5-15 zeigt, dass es starke Schwankungen der Leistungsaufnahme gibt und diese einem nachvollziehbaren wöchentlichen Muster folgen. Eine detailliertere Auswertung der Lastprofile ermöglicht die Zuordnung von Spitzenlasten, Teillasten, Grundlasten und dem Stand-by-Betrieb.

Ordnet man die momentanen Leistungsaufnahmen entsprechend deren Höhe absteigend über die Zeit, erhält man eine dafür geeignete Darstellung in Form einer Jahresdauerlinie (siehe

Abbildung 5-16). Unter Annahme eines unveränderten produktbezogenen Nutzens im Volllastfall, einem stark abfallenden Nutzen im Teillastfall und keinem generierten Nutzen im Grundlastfall, wird die Jahresdauerlinie in Abbildung 5-16 um den leistungsbezogenen PhO-Faktor erweitert.

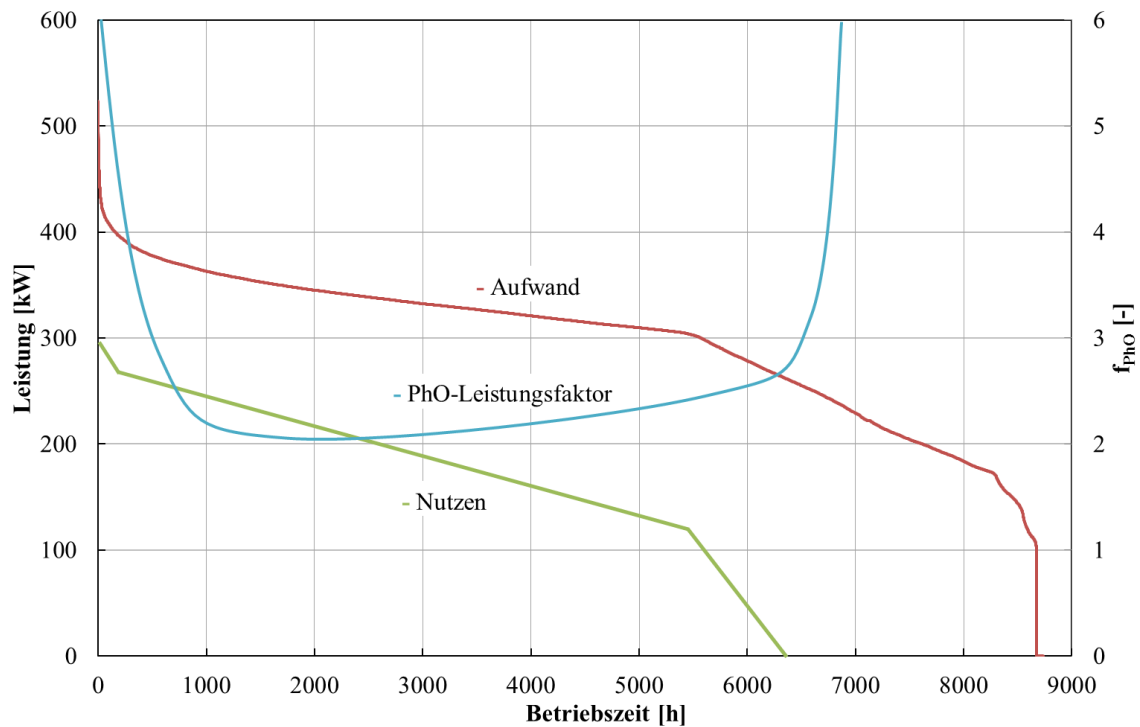


Abbildung 5-16: Darstellung der Jahresdauerlinie einer Druckluftversorgung erweitert um einen exemplarischen Nutzen und den resultierenden PhO-Leistungsfaktor

Der leistungsbezogene PhO-Faktor ist ein Maß der momentanen Effizienz und spiegelt den momentanen Anlagen- und Prozesszustand wieder. Solange der Prozess keinen Nutzen generiert, ist der leistungsbezogene PhO-Faktor unendlich. Auf Basis dieser Erkenntnisse lassen sich ineffiziente Anlagenzustände identifizieren und Verbesserungen ableiten. Durch die Vermeidung von Stand-by-Zuständen, die Verkürzung von Anfahrprozeduren oder der Umgestaltung des Prozessablaufes können erhebliche Verbesserungen erzielt werden (Abbildung 5-17).

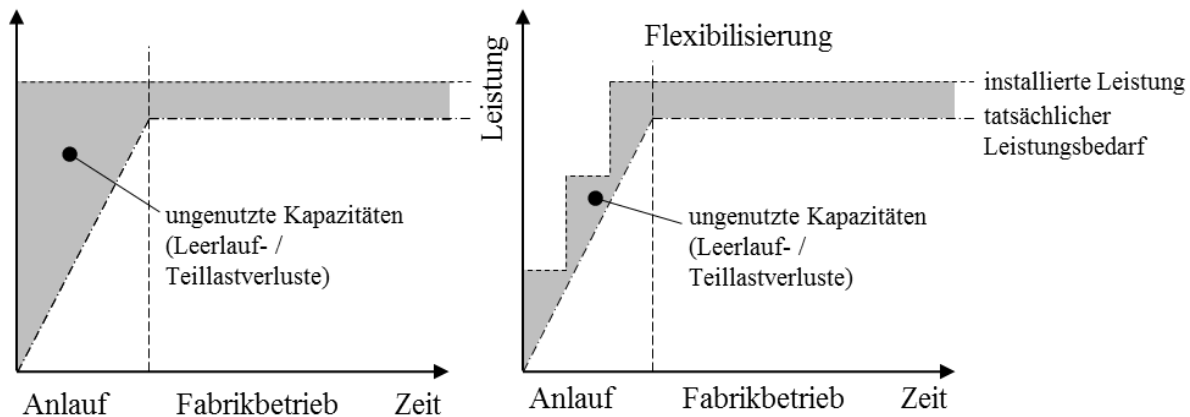


Abbildung 5-17: Verbesserung der leistungsbezogenen Effizienz durch gestufte Anfahrprozeduren in Anlehnung an (vgl. Müller et al. 2009, S.14)

Abweichungen der momentanen Effizienz lassen Rückschlüsse auf den Zustand der Anlagentechnik, auf gekoppelte Prozesse sowie der Qualität der Ausgangsstoffe zu und dient somit dem Betreiber, gezielt auf Änderungen einzuwirken.

Obwohl die Verbesserung von Prozessen die Leistungsverläufe berücksichtigt, kann die Wirksamkeit nur durch Betrachten des Verbrauchs dargestellt werden. Dazu muss der Leistungsbezug aus der Jahresdauerlinie über die Dauer des jeweiligen Prozesszustandes integriert werden. Als Ergebnis steht eine praktikable Übersicht der Effizienz der jeweiligen Anlagenzustände unter Berücksichtigung der momentanen Effizienz zur Verfügung.

5.6 Kopplung idealer Referenzprozesse

Produktionsprozesse bestehen aus einer Vielzahl gekoppelter Prozesse. Dabei kann die Kopplung zweier Prozesse in Summe effizienter sein als jeder Prozess für sich. Volta beschreibt drei Formen von Kopplungen (vgl. Volta 2014, S.69). Die externe Kopplung (EKP) betrifft die Verbindung mit separaten Prozessen - z.B. die Abwärmenutzung. Prozesskaskaden (PKK) stehen für hintereinander geschaltete Prozesse und interne Kopplungsprozesse (IKP) nutzen die prozesseigenen ungenutzten Ressourcen innerhalb des Prozesses (siehe Abbildung 5-18). Dabei setzt Volta eine Neubewertung der gekoppelten Prozesse nach der Methode des PhO voraus.

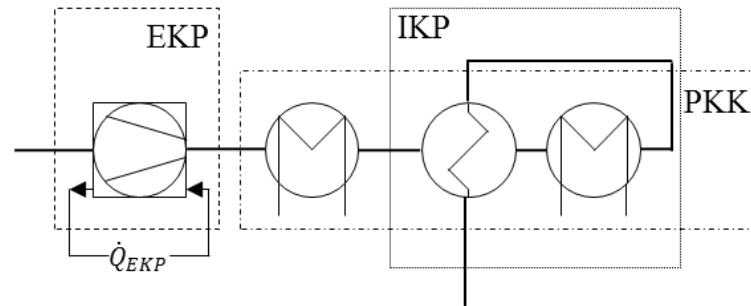


Abbildung 5-18: Kopplungsvariante von Prozessen am Beispiel einer Druckluftversorgung mit anschließender Kühlung in Anlehnung an (Volta 2014, S. 69)

Für bereits mittels PhO analysierte Prozesse, der ganzheitlichen Bewertung von Versorgungstechnik und Prozessverbrauch sowie für die Bewertung nachgerüsteter Anlagentechnik sollen zwei weitere Aspekte aufgeführt werden. Zum einen die Kombination von Verbrauch und Bereitstellung und zum anderen redundante oder mehrlinige Prozesse.

Kombination von PhO-Faktoren aus Bedarfs- und Verbrauchsperspektive

Nach der Einführung der Bewertung von bereitstellenden Prozessen mittels des PhO ist die Bewertung gekoppelter Prozesse aus den Perspektiven des Bedarfes und des Verbrauchs zur Bewertung der Gesamtbetriebsweisen möglich. Das Ziel ist es, die einzelnen Verbesserungen eines Systems aus bereitstellenden Prozessen und Produktionsprozessen mit einem Bedarf sowohl separat als auch zusammen bewerten zu können. Ein System soll dann durch das Verhältnis zwischen dem Nutzen und dem für die Erzeugung dieses Nutzens notwendigen Aufwand bewertet werden. Der Systemquotient (F_{PhO}^{ges}) ist das Verhältnis aus dem für die Bereitstellung getätigten Aufwand (V_{PhO}) – Verbrauchsperspektive – und dem prozessbedingten Aufwand (B_{PhO}) – Bedarfsperspektive – wie in Formel 19 dargestellt.

$$F_{PhO}^{ges} = \frac{V_{PhO}}{B_{PhO}} \quad (19)$$

Der Gesamt-PhO-Faktor eines Systems kann unter Verwendung der Formel 8 (Bedarfsperspektive) und Formel 9 (Verbrauchsperspektive) aus diesen beiden Faktoren berechnet werden. Setzen sich die perspektivischen PhO-Faktoren aus mehreren Einzelbewertungen zusammen, kann der jeweilige perspektivische PhO-Faktor aus den Einzelfaktoren nach Volta (siehe Volta 2014, S. 36) errechnet werden. Es wird von einem ideal verlustfrei gekoppelten System ausgegangen. Der in dem bereitstellenden System generierte Nutzen entspricht dem Aufwand des Bedarfsprozesses ($V=B$).

$$F_{PhO}^{ges} = \frac{V / F_{PhO}^V}{B / F_{PhO}^B} = \frac{F_{PhO}^B}{F_{PhO}^V} \quad (20)$$

In einem idealen verlustfreien System, bestehend aus verbrauchenden Prozessen und Prozessen mit einem Bedarf, wären die perspektivischen PhO-Faktoren gleich Eins und somit der PhO-Faktor des Gesamtsystems ebenfalls Eins. Der PhO-Faktor strebt mit steigender Effizienz in der Bedarfsperspektive von unendlich gegen Eins und in der Verbrauchsperspektive von Null gegen Eins. Der PhO-Faktor des Gesamtsystems ist demnach größer als Eins.

$$F_{PhO}^{ges} \geq 1 \quad (21)$$

Die exemplarische Darstellung des PhO-Faktors des Gesamtsystems basierend auf den perspektivischen PhO-Faktoren ist in Abbildung 5-19 dargestellt.

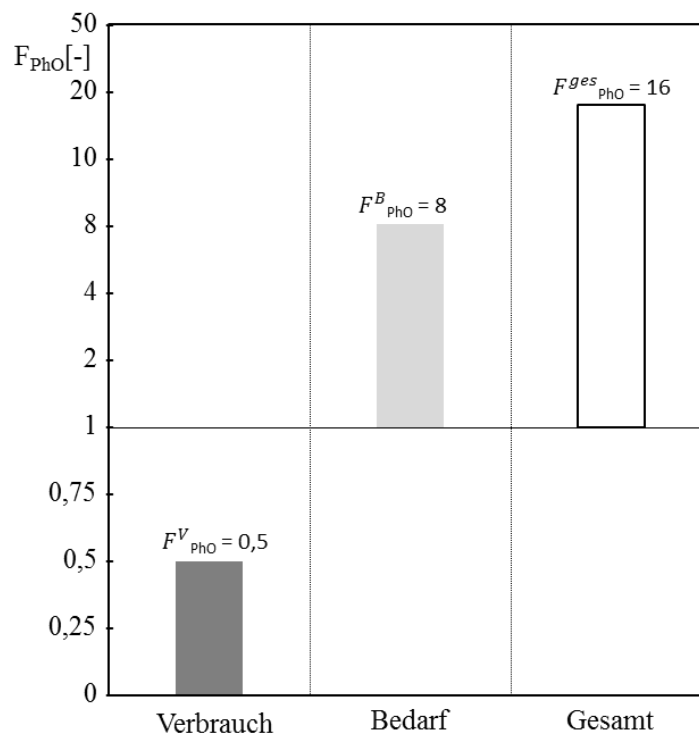


Abbildung 5-19: Exemplarische Darstellung der perspektivischen PhO-Faktoren sowie des resultierenden PhO-Faktors des Gesamtsystems

Unter Verwendung Voltas erweiterter Verlustkaskade (vgl. Volta 2014, S. 85) und unter Beachtung der beiden Prozessperspektiven könnte die Darstellung der Gesamteffizienz ähnlich der in Abbildung 5-20, der erweiterten Verlustkaskade für Gesamtbetriebsweisen, erfolgen. Der linke Teil besteht aus der perspektivischen Betrachtung der in dem System enthaltenen

Bewertung der Gesamtbetriebsweise mit Hilfe des System-PhO-Faktors (siehe Formel 19) ermöglicht es, die reale Effizienz des Systems mit der im idealen Fall möglichen Effizienz zu vergleichen. Sowohl die Verbesserung der Bedarfsprozesse als auch der Verbrauchsprozesse ist mit dieser Systemkennzahl für die Gesamtbetriebsweise ganzheitlich nachvollziehbar.

Effizienz und Effektivität

Die perspektivische Betrachtung von Systemen kann ebenfalls dazu verwendet werden, um für bereits in der Anwendung befindliche Faktoren äquivalente Kennzahlen unter Berücksichtigung des PhO zu bilden. Unter dem Gesichtspunkt der Effizienz, also den Aufwand zur Erreichung eines definierten Nutzens zu minimieren, kann mit der durch die Methodik definierten Größen der ideale Nutzen im Verhältnis zu dem realen Aufwand stehen. Für die Betrachtung eines gekoppelten Systems ist das der reale Verbrauch im Bezug zum idealen Bedarf. Dieser Faktor ähnelt dem Reziproken des Gesamtwirkungsgrades.

Der Gesichtspunkt der Effektivität stellt den erreichbaren Nutzen in den Vordergrund und vernachlässigt den dafür erforderlichen Aufwand. Unter Anwendung der Methode der grenzwertorientierten Bewertung könnte der Quotient aus dem realen Bedarf – als Nutzen – und dem idealen Verbrauch – als Aufwand – ein Maß für die Bewertung der Effektivität verwendet werden.

Redundanz

In einigen Produktionssystemen sind redundante Anlagen oder Apparate sowie Prozesse vorhanden. Neben dem parallelen Betrieb zweier gleicher Anlagen oder Produktionslinien – heiße Redundanz – werden aus Sicherheitsgründen bedeutende Anlagen doppelt ausgeführt, um die Betriebssicherheit zu erhöhen – kalte Redundanz. Neben solchen homogenen Redundanzen bestehen vor allem gewachsene Produktionen und Anlagen aus verschiedenartigen Redundanzen. Mehrere unterschiedliche Apparate oder Teilprozesse stellen somit sicher, dass der Gesamtprozess betrieben werden kann. Als Beispiel kann hier ein Kältesystem einer Fabrik betrachtet werden, das aus mehreren Kälteanlagen zusammengesetzt ist und eine Kältebereitstellung sicherstellen soll.

Für die Bewertung der Effizienz solcher redundanten Prozesse stehen der Gesamtnutzen und der Gesamtaufwand des zusammengesetzten Systems im Vordergrund. Für eine perspektiventreue Betrachtung kann die Gesamteffizienz auf Basis der Teileffizienzen analog

Volta's Berechnungen (Volta 2014, S. 36) ermittelt werden. Dabei werden die spezifischen realen und idealen Bedarfe eines Systems zusammengefasst. Der Quotient aus dem Gesamtaufwand und dem Gesamtnutzen des redundanten Systems steht für die Gesamteffizienz in Form des PhO-Faktors.

$$F_{PhO}^{ges,R} = \frac{B_{gesamt}}{B_{PhO,gesamt}} = \frac{B_1 + B_2 + \dots}{B_{PhO,1} + B_{PhO,2} + \dots} = \frac{\sum B_i}{\sum B_{PhO,i}} \quad (22)$$

Die Effizienz eines redundanten Prozesses ist somit von den spezifischen Effizienzen der Einzelanlagen und deren Auslastung abhängig sowie der Kombination der Einzelanlagen zur Bereitstellung des Gesamtnutzens. Dabei muss die dynamische Effizienz der Einzelanlagen für die Kombination mehrerer Anlagen berücksichtigt werden (siehe Abbildung 5-21).

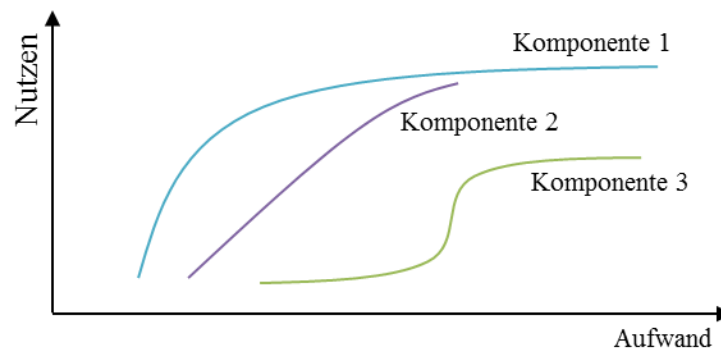


Abbildung 5-21: Die spezifische dynamische Effizienz eines redundanten Prozesses

In Abhängigkeit des benötigten Gesamtbedarfs (Nutzen) können die redundanten Komponenten entsprechend deren dynamischen Verhaltens so verschaltet werden, dass der Aufwand minimiert und die Effizienz maximiert wird. Die Art der Verschaltung ist unter Berücksichtigung der Betriebscharakteristik und Grenzen für den Einzelfall zu prüfen.

5.7 Kennzahlen zur ganzheitlichen Prozessbewertung

Neben der reinen energetischen oder stofflichen Bewertung eines Prozesses hinsichtlich dessen direkten prozessgebundenen Parametern, also zum Beispiel der Aufwendung von Energie zur Bereitstellung und Nutzung von Energie, kann die Bewertung um einen ganzheitlichen Ansatz erweitert werden. Dabei stehen der Prozess und dessen Nutzen im Fokus. Dazu kann die Bewertung um energetische, produktions- oder verfahrenstechnische Belange sowie um eine betriebswirtschaftliche Sichtweise erweitert werden. Eine dimensionslose Bewertung der

Prozesse ist somit nicht zwangsläufig notwendig. Dabei ist darauf zu achten, dass die vergleichende Bewertung eines Prozesses aus unterschiedlichen Perspektiven und Aspekten nur durchführbar ist, wenn der Bezug auf den Prozess und dessen Nutzen gleich ist.

Prozessbedingte Bewertung

An Prozessen sind in der Regel mehrere Formen von Energien und Ressourcen beteiligt. Eine direkte vergleichende Bewertung der beteiligten Energieformen und Ressourcen ist aus bilanzieller Sicht nicht möglich. Allerdings hat sich zum Beispiel im energetischen Bereich die Bildung von Äquivalenten, im Besonderen in Bezug auf die Primärenergie, etabliert. Somit kann jede an einem Prozess beteiligte Energieform mit Hilfe des jeweiligen Primärenergiefaktors in Form des dafür notwendigen Primärenergieäquivalents bestimmt werden. Das folgende Beispiel zeigt, wie der Gesamtbedarf an Primärenergie ausgehend von deren Faktoren für die innerbetriebliche Nutzung von elektrischer oder thermischer Energie errechnet werden kann.

$$B_{PE,\dot{a}q}^{ges} = f_{PE,el} \cdot B_{el} + f_{PE,therm} \cdot B_{therm} + \dots \quad (23)$$

Eine solche äquivalente Betrachtung kann auf weitere Energieformen oder in Bezug auf die technischen Medien innerhalb des Bilanzraumes analog Voltas Darstellungen von Verlustfaktoren technischer Medien (vgl. Volta 2014, S.67) durchgeführt werden. In der Regel ist der Bezug auf die Primärenergie für die Bewertung des Prozesses seitens dessen Betriebs weniger geeignet. Wechselnde Primärenergiefaktoren und die für den Prozess zu abstrakten Äquivalente sowie die fehlende Vergleichbarkeit mit der stofflichen Prozessbewertung sind die größten Schwachstellen für die Anwendbarkeit.

Die Methode der grenzwertorientierten Bewertung legt die Grundlage für ein geeignetes prozessspezifisches Äquivalent. Das PhO-Äquivalent ist durch den Nutzen des Prozesses, dessen Ablauf und Verknüpfung in einem System sowohl für die Verbrauchs- als auch für die Bedarfsperspektive eindeutig bestimmt. Der Nutzen kann auf Basis des Prozessmodells für alle daran beteiligten Energieformen und Ressourcen zu jedem an dem Prozess notwendigen Aufwand ins Verhältnis gesetzt werden. In Form eines Netzdiagrammes (siehe Abbildung 5-22) können somit die spezifischen PhO-Faktoren (F_i^B) eines Prozesses vergleichend und unter Berücksichtigung des jeweiligen optimale Nutzens und realem Bedarf des Prozesses dargestellt werden.

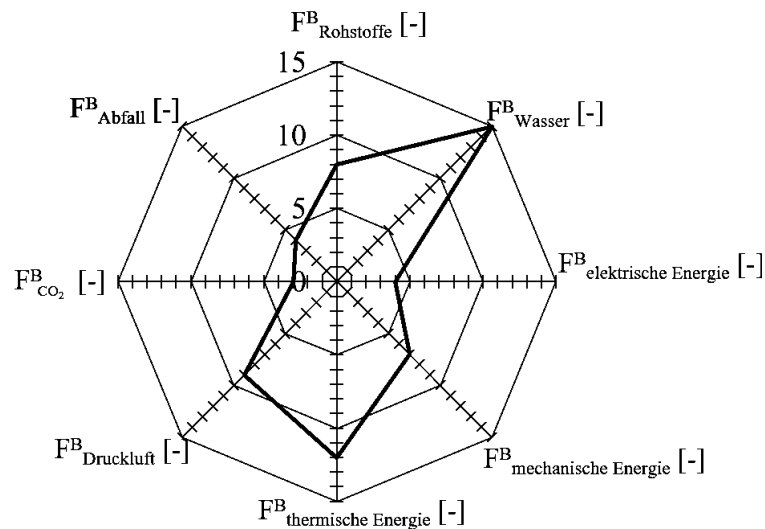


Abbildung 5-22: Netzdiagramm eines Prozesses mit Hilfe spezifischer PhO-Faktoren

Für einen quantitativen Vergleich der Gesamteffizienz unter Berücksichtigung aller für die Bewertung des Prozesses verwendeten spezifischen Kennzahlen kann ein für den jeweiligen Prozess einzigartiger Gesamtfaktor gebildet werden.

$$F_{PhO,Prozess} = F_{PhO,el} \times F_{PhO,therm} \times F_{PhO,stoff} \times \dots \quad (24)$$

Dieser sehr komplexe Faktor kann nur für die Bewertung des individuellen Prozesses herangezogen werden.

Ökonomische und ökologische Prozessbewertung

Neben der technisch geprägten Bewertung werden Prozesse mit großer Akribie seitens betriebswirtschaftlicher Gesichtspunkte analysiert und bewertet. Monetäre Zusammenhänge werden vorrangig über die Bilanzierung der äußeren Systemgrenzen, zum Beispiel dem Einkauf von Energie, Rohstoffen, etc. und Betriebskosten bis hin zum Verkauf des Produktes, geschlossen. Dabei unterliegen betriebswirtschaftliche Bestrebungen zur Steigerung der Effizienz den gleichen Grenzen wie die technischen Bemühungen. Entscheidend ist daher das Verständnis über den Prozess und die Verbindung zu der betriebswirtschaftlichen Wirkung von Veränderungen.

Ähnlich der technischen Bewertung kann die betriebswirtschaftliche Bewertung auf Basis der grenzwertorientierten Methodik unter Bezug auf den idealen Referenzpunkt erfolgen. Somit unterliegt der Prozess aus technischer Sicht Grenzen bzgl. dessen Effizienz, die nicht unterschritten werden können. Sie stehen für einen idealen Bedarf an Energie und Ressourcen.

Das Beispiel in Abbildung 5-23 zeigt qualitativ, dass der prozessbedingten idealen und realen Menge an Energie sowohl eine ökonomische oder ökologische ideale und reale Menge zugeordnet werden können. Analog der prozessspezifischen Grenzen existieren somit weitere technisch begründete Äquivalente.

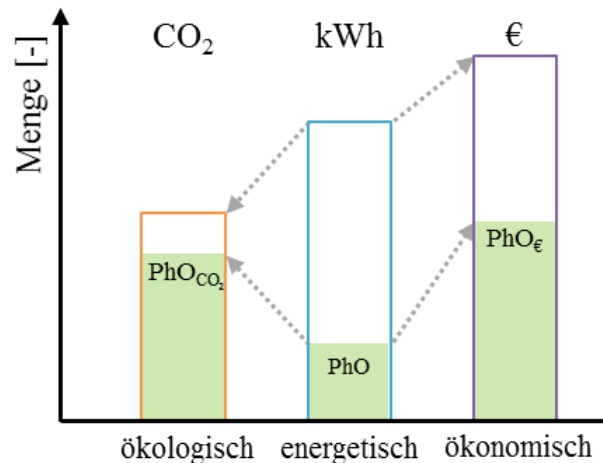


Abbildung 5-23: Ökonomische und ökologische PhO-Äquivalente eines Prozesses

Der Zusammenhang zwischen den technischen und betriebswirtschaftlichen Bewertungen ist stark von den ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen beeinflusst. Somit sind die technischen Bedarfe eines Prozesses durch Betriebsweise, Komponenten, Effizienz sowohl für den idealen als auch für den realen Fall prozessbedingt fixiert. In Abhängigkeit der Energie-, Betriebs-, Rohstoffkosten können die ökonomischen Äquivalente eines bestehenden Prozesses u.U. erheblich variieren. Allerdings sind die Grenzen dieser durch den realen und idealen Prozess festgelegt. Gleiches gilt für ökologische Betrachtungen. So können die CO_2 -Emissionen u.U. stärker durch die verwendeten Edukte beeinflusst werden als durch eine Steigerung der Effizienz des Prozesses.

Die grenzwertorientierte Bewertung des Prozesses bildet daher die Grundlage für eine ganzheitliche technische ökologische und ökonomische Betrachtung. Die Maßstäbe können den individuellen Bedürfnissen der Bewertung angepasst und erweitert werden. Die Wirkung prozessbedingter Änderungen kann somit leicht aus nichttechnischen Gesichtspunkten analysiert und ebenfalls bewertet werden. Als Beispiel für die Darstellung der technischen, ökonomischen und ökologischen Äquivalente soll die mehrdimensionale Verlustkaskade als Erweiterung der Verlustkaskade nach Volta (vgl. Volta 2014, S.85) dienen.

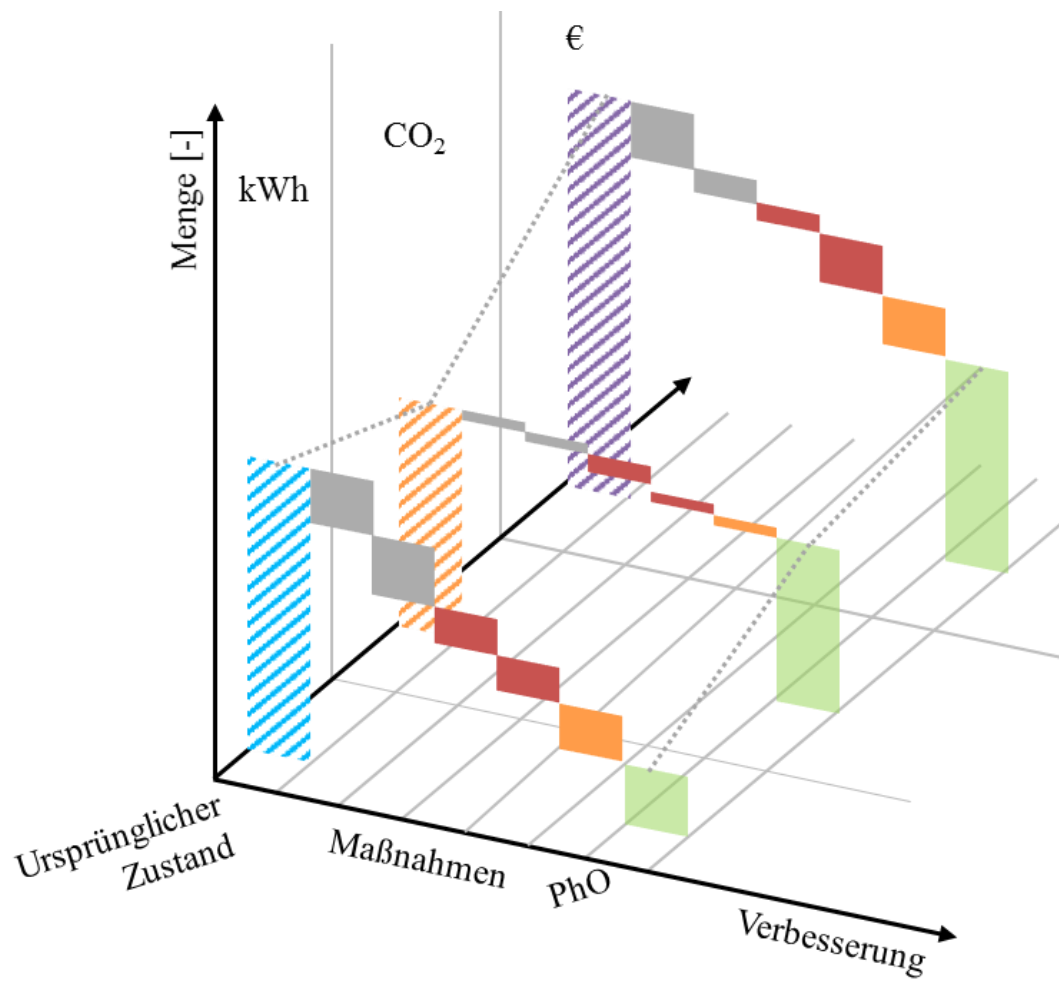


Abbildung 5-24: Mehrdimensionale Verlustkaskade mit technischen, ökonomischen und ökologischen Äquivalenten

5.8 Kompakte Darstellung der Systematik

Die grenzwertorientierte Methode bietet Werkzeuge, welche entsprechend der Bedürfnisse des Anwenders individuell verwendet und kombiniert werden können. Abbildung 5-25 stellt den Ablauf der Systematik in zehn groben Zügen dar.

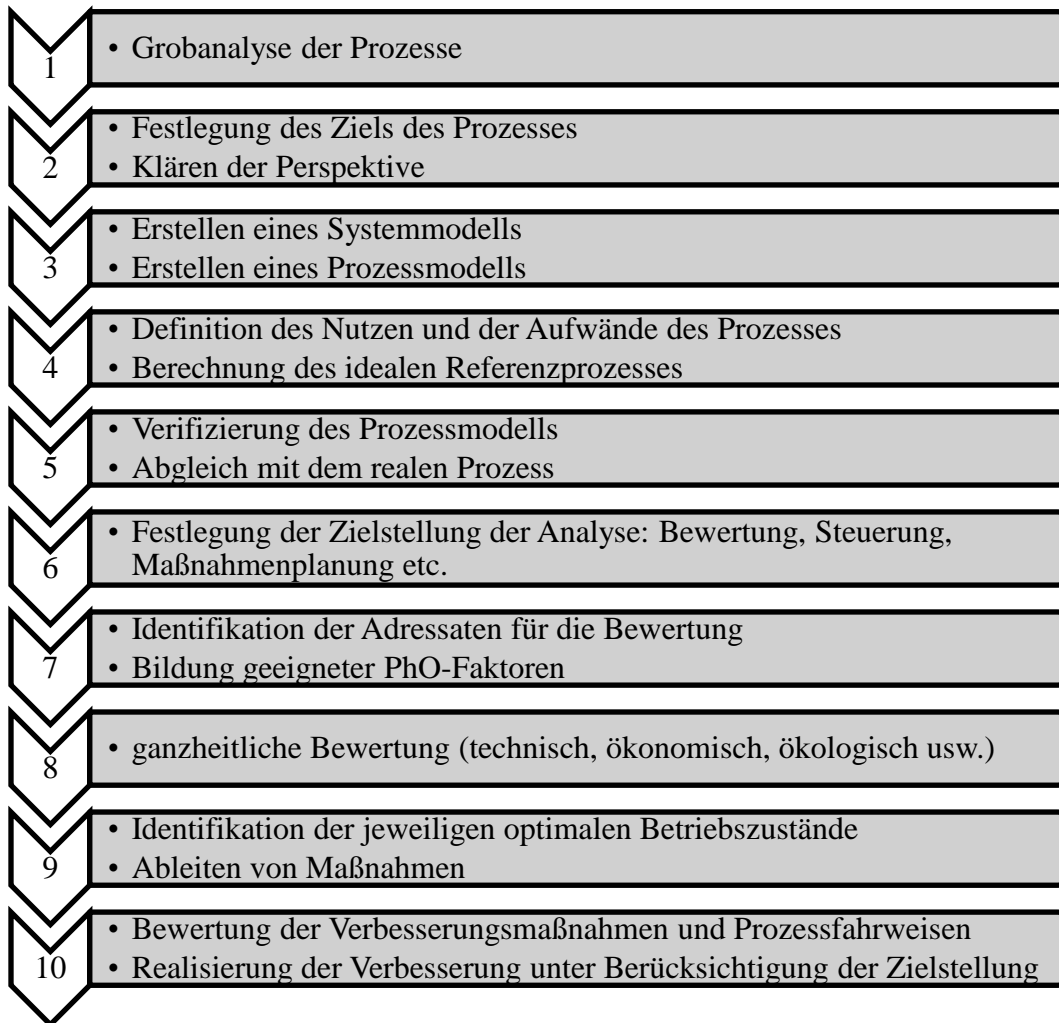


Abbildung 5-25: Ablauf der Systematik der grenzwertorientierten Methodik

Je nach vorhandener Prozesskenntnis können Schritte übersprungen werden. Die Auswahl der Werkzeuge richtet sich nach der Komplexität, der Größe und der vorhandenen Kenntnis über das System sowie des gewünschten Detailgrades der Analyse. Die Grundlage dabei bildet immer der ideale Referenzprozess, das PhO. Darauf aufbauend können vielseitige spezifische und allgemeine Bewertungen durchgeführt werden, welche wiederum sowohl für die Prozesssteuerung als auch für die Planung von Verbesserungsmaßnahmen verwendet werden können.

6 Anwendung der grenzwertorientierten Methode

Die grenzwertorientierte Methode ermöglicht eine vielseitige Anwendung. Als Methodik zur Bewertung von Gesamtbetriebsweisen berücksichtigt diese die Spezifik jedes Prozesses oder Systems. In die Analyse fließen die systemischen Zusammenhänge von Prozessen, deren Nutzen und Aufwand, das Prozesssystem, die Anlagentechnik, die Zielstellung der Bewertung, der adressierte Anwenderkreis der Analyse, usw. ein. Da kaum ein Prozess oder System einem anderen gleicht, wird im Folgenden die Anwendung der grenzwertorientierten Methode an fiktiven Prozessen dargestellt. Das systematische Herangehen an eine individuelle Prozess- oder Systembewertung kann analog der aufgeführten Beispiele und unter Berücksichtigung des Ablaufs der Systematik erfolgen.

Zur Darstellung der Erweiterung der Methodik des physikalischen Optimums werden mit diesen Beispielen drei wesentliche Aspekte der grenzwertorientierten Methode angewendet (siehe Abbildung 6-1). Anhand bilanzieller Bewertung erfolgt die perspektivische Betrachtung von Prozessen. Dazu werden Verbrauchs- und Bedarfsprozesse bewertet. Die leistungsbezogene Bewertung erfolgt am Beispiel der Bedarfsperspektive. Zuletzt wird die grenzwertorientierte Analyse der Prozesskapazität durch die Betrachtung des Energietransportes erläutert.

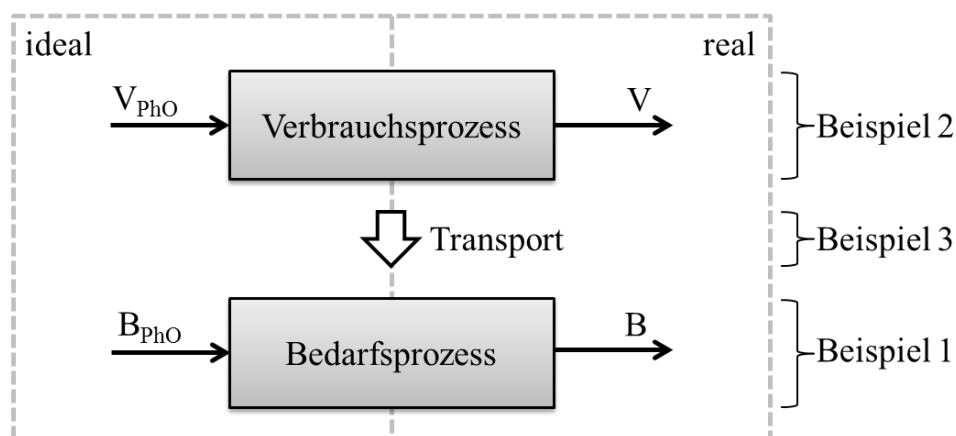


Abbildung 6-1: Darstellung der drei gewählten Beispiele zur Anwendung der grenzwertorientierten Methode

6.1 Bilanzielle Prozessbewertung

Die bilanzielle Bewertung wird durch die Perspektive der Betrachtung, Verbrauch oder Bedarf, unterschieden. Prozesse, die Primär- bzw. Sekundärenergieträger oder andere Ressourcen einsetzen, um Endenergie oder Hilfsstoffe bereitzustellen, werden als Verbrauchsprozesse betrachtet. Das Ziel der betreffenden Verbesserung ist die effizientere Nutzung der Ausgangsströme. Prozesse mit einem Bedarf an Endenergie oder Hilfsstoffen werden unter dem Gesichtspunkt der effizienten Nutzung des notwendigen Aufwands bewertet, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen.

Am Beispiel typischer Energieflüsse einer Fabrik kann eine grundlegende Unterscheidung beider Perspektiven erfolgen. Der Produktionsprozess ist im Allgemeinen ein Bedarfsprozess. Eine Wärmebereitstellung basierend auf der Verbrennung von Primärenergieträgern ist prinzipiell ein Verbrauchsprozess. Allerdings muss die Perspektive zur Bewertung individuell geprüft werden. Abbildung 6-2 zeigt in Anlehnung an Müllers Darstellung typischer Energieflüsse durch eine Fabrik (vgl. Müller et al. 2009, S. 159) die Verbrauchs- und Bedarfsperspektive einer Fabrik.

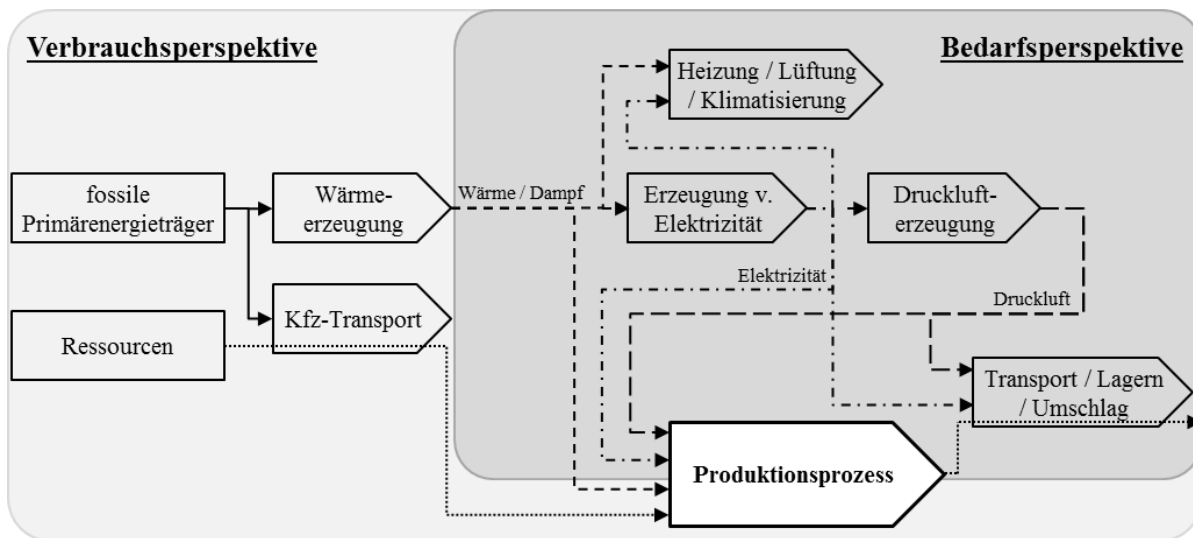


Abbildung 6-2: Exemplarische Verbrauchs- und Bedarfsprozesse einer Fabrik

6.1.1 Bilanzielle Prozessbewertung aus der Bedarfsperspektive

In der Industrie ist die Wassererwärmung vorrangig für die Prozessbeheizung realisiert. Im öffentlichen und privaten Sektor dient sie der Klimatisierung der Gebäude und für sanitäre Zwecke. Deren Temperaturniveau und die ideale Wärmemenge sind in der Regel durch dessen

Anforderungen vorgegeben. Der reale Bedarf an Wärme wird durch die Fahrweise, im Besonderen durch den zeitlich veränderlichen Bedarf an Wärme, beeinflusst.

Als Beispiel für einen typischen Bedarfsprozess wird der Warmwasserbedarf für private sanitäre Zwecke unter Berücksichtigung der Systematik der grenzwertorientierten Methode näher betrachtet.

Eine **grobe Betrachtung** zeigt bereits die Vielfalt des Prozesses und der Systeme, mit deren Hilfe Warmwasser erzeugt werden kann. Eine Warmwasserbereitstellung ist über ein Fernwärmesystem, ein Nahwärmesystem oder eine dezentrale Wassererwärmung mittels unterschiedlicher Energieträger möglich (siehe Abbildung 6-3).

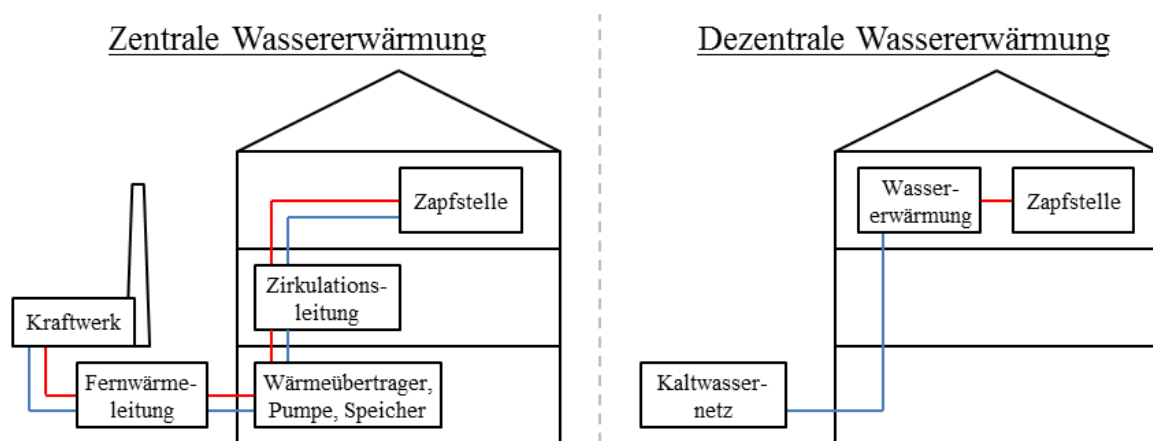


Abbildung 6-3: Beispiele für Systeme zur Bereitstellung von Warmwasser für sanitäre Zwecke

Das **Ziel** der Warmwasserbereitstellung ist es, eine definierte Menge warmen Wassers mit der gewünschten Temperatur zum Zeitpunkt des Bedarfes zur Verfügung zu stellen. Da der Nutzen gleich dem Bedarf an warmem Wasser ist, handelt es sich um einen Prozess aus der Bedarfsperspektive. So vielseitig die Systeme zur Warmwasserbereitstellung sind, so vielseitig sind ebenfalls die zeitlichen Bedarfe an Warmwasser an einer Zapfstelle. Als **Modell eines Prozesses** soll hier ein Zapfprofil, repräsentativ für einen durchschnittlichen europäischen Warmwasserbedarf, in Anlehnung an das Lastprofil M der DIN EN 13203-2 bzw. Zapfprogramm 2 der DIN EN 15316-3-1, verwendet werden. Das detaillierte Zapfprofil, der zeitliche Verlauf der Zapfungen sowie die Durchflüsse in Abhängigkeit der Zapfarten, befinden sich im Anhang 3. Das Profil beinhaltet für eine Person täglich 16 kleine Zapfungen von je ca. 2 Liter, 5 Zapfungen für Bodenreinigung, Geschirrspülen und Haushaltsreinigung von insgesamt ca. 26 Liter und zweimaliges Duschen von je 45 Liter warmen Wassers. Das Zapfprofil gibt vor, dass die Zapfungen in dem Zeitraum von 07:00 Uhr bis 21:30 Uhr

stattfinden. Der **Nutzen** des Prozesses liegt darin, den täglichen Warmwasserbedarf einer Person entsprechend des Zapfprofils (siehe Abbildung 6-4) zu decken. Der **Aufwand** ist die dafür aufzubringende Energie.

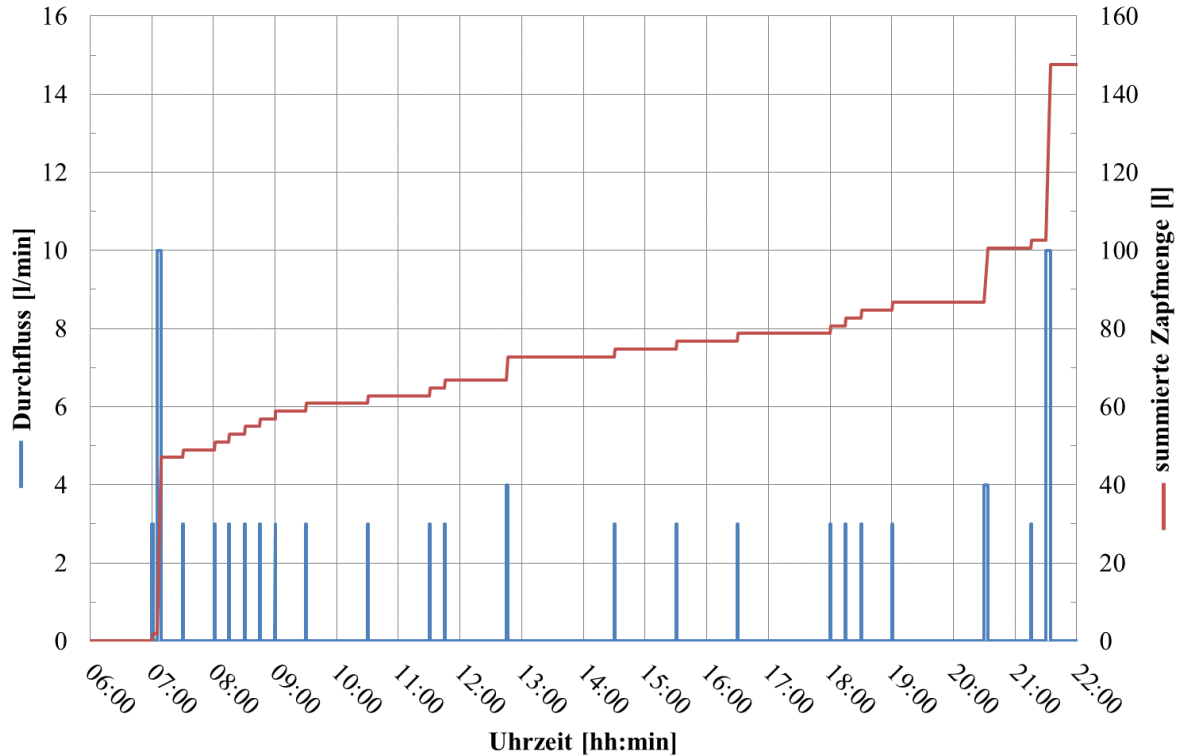


Abbildung 6-4: Warmwasserdurchfluss und summierte Zapfmenge entsprechend des Zapfprofils

Die **Berechnung des idealen Referenzprozesses** beruht auf der notwendigen zuzuführenden Wärme (Q) unter Berücksichtigung der Wärmekapazität des Wassers (c_p) zur Erreichung der gewünschten Warmwassertemperatur für die erforderliche Menge warmen Wassers (m). Als Temperatur des zu erwärmenden Wassers (ϑ_1) werden $10\text{ }^\circ\text{C}$ und für die Zieltemperatur (ϑ_2) $36\text{ }^\circ\text{C}$ angenommen. Die ideale Wärmeleistung (\dot{Q}_{PhO}) und die ideale Wärmemenge (Q_{PhO}) berechnen sich wie folgt:

$$\dot{Q}_{PhO} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (25)$$

$$Q_{PhO} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_{PhO} dt = m \cdot c_p \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (26)$$

Für die Berechnung der idealen Wärme zur Warmwasserbereitstellung wird die Wärmekapazität von $1,476\text{ kJ/kg K}$ und eine Dichte von 1 kg/l für Wasser zu Grunde gelegt. Tabelle 1 enthält die je Zapfart benötigte und physikalisch ideale Wärmemenge und -leistung entsprechend des Zapfprofils.

Tabelle 1: Die ideale benötigte Wärme nach Art der Zapfung entsprechend des Zapfprofils

Zapfart	Leistung [kW]	Menge [kWh]
Kleine Zapfung	5,43	0,0597
Duschen	18,1	1,357
Bodenreinigung	5,43	0,0597
Geschirrspülen 1	7,23	0,181
Haushaltsreinigung	5,43	0,0597
Geschirrspülen 3	7,23	0,422

In Abbildung 6-5 sind die berechnete ideale Wärmemenge und ideale Wärmeleistung als Wärmeprofil dargestellt.

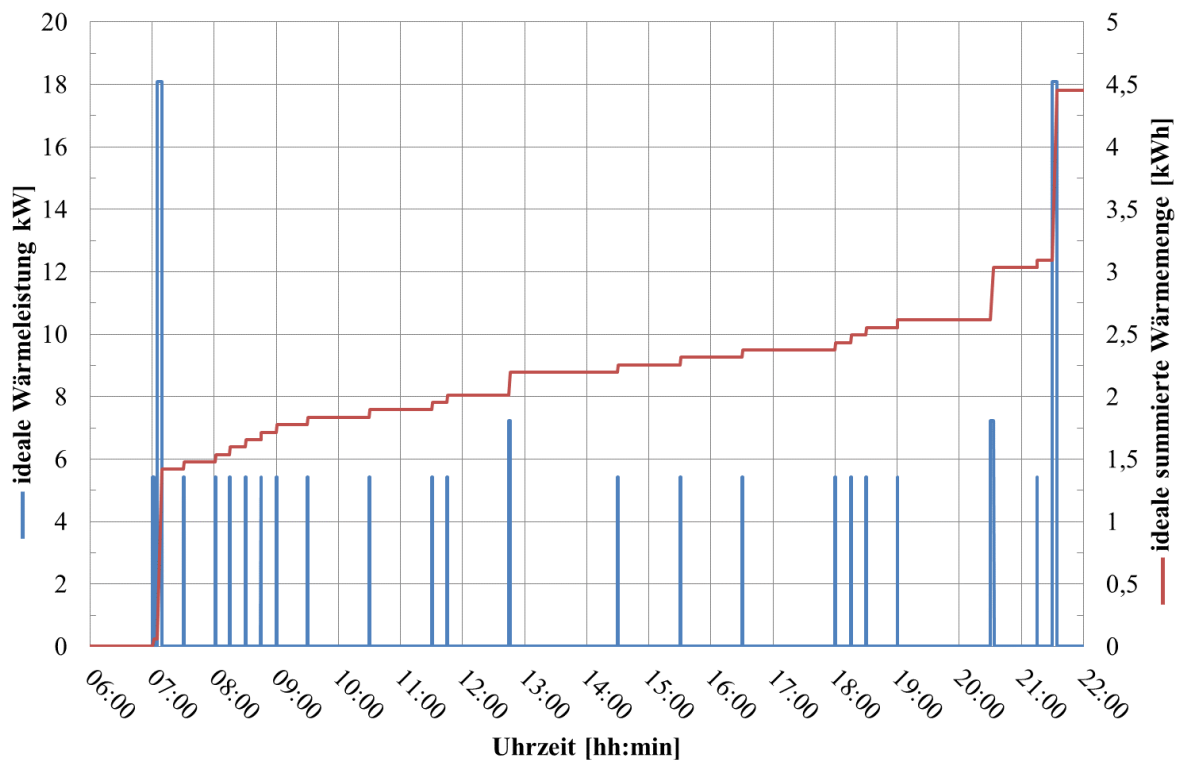


Abbildung 6-5: Täglicher idealer Leistungsbedarf und idealer Wärmemengenbedarf zur Warmwasserbereitstellung

Es wird angenommen, dass der ideale Bedarf an Warmwasser, basierend auf dem fiktiven und genormten Prozessmodell, **nachvollziehbar und wahrheitsgemäß** ist. Das Modell entspricht dem **realen Warmwasserbedarf**. Das **Ziel der Prozessbewertung** ist es, nachzuweisen, dass der zeitlich veränderliche Bedarf an Warmwasser für die Verbesserung der Effizienz des Systems zu berücksichtigen ist. Dazu sollen ein zentrales und ein dezentrales System zur Warmwasserbereitstellung stark vereinfacht analysiert werden. Wie in Abbildung 6-5

dargestellt, soll ausschließlich die Sicherstellung der Warmwasserversorgung des Zapfprofils an einer Zapfstelle betrachtet werden. Verluste bei der Gewinnung und dem Transport von Primärenergieträgern sowie bei der Wandlung in Endenergie sollen nicht berücksichtigt werden. Um technische Einflüsse weitestgehend auszuschließen und eine gute Vergleichbarkeit beider Systeme zu erreichen, werden ausschließlich die warmwasserseitigen Einflüsse beachtet. Verluste durch ein Ein- bzw. Ausregeln sind vernachlässigt.

Der leistungsbezogene PhO-Faktor wird mittels Formel 27 und der mengenbezogene PhO-Faktor wird mittels Formel 28 berechnet.

$$f_{PhO,Zapf} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{PhO}} \quad (27)$$

$$F_{PhO,Zapf} = \frac{Q_{real}}{Q_{PhO}} \quad (28)$$

Dezentrale Wassererwärmung:

Die dezentrale Wassererwärmung findet nur statt, solange der Bedarf entsprechend des Zapfprofils vorhanden ist. Es wird zur vereinfachten Vergleichbarkeit angenommen, dass im Falle des Bedarfs die Wärme durch das erhitzende System sofort zur Verfügung steht. Der betrachtete Erhitzer und die Zapfstelle haben keine Verluste durch ein Ein- bzw. Ausregeln. Im Falle einer Zapfung würden Wärmeverluste durch die Zuleitung zur Zapfstelle entstehen. Die Zuleitung ist ein Kupferrohr mit einem Außendurchmesser (d_a) von 15 mm, einer Wandstärke von 1 mm und einer Länge (l) von 5 m. Zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten (k) der Zuleitung werden mit der folgenden Formel Vereinfachungen vorgenommen.

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_{in} \cdot d_{in}} + \frac{1}{2\lambda_n} \cdot \ln\left(\frac{d_{a,n}}{d_{in,n}}\right) + \dots + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a}} \quad (29)$$

Die sehr gute Wärmeleitfähigkeit (λ) des Kupferrohrs ermöglicht die Vernachlässigung des betreffenden Terms. Unter Verwendung eines von freier Konvektion geprägten Wärmeübergangskoeffizienten an der Außenseite des Rohrs (α_a) von 10 W/m² K und einem durch Zwangsdurchströmung geprägten Wärmeübergangskoeffizienten an der Innenseite des Rohrs (α_{in}) von 2000 W/m² K wird der Wärmedurchgangskoeffizient auf 0,5 W/m² K gerundet. Die Umgebungstemperatur (ϑ_u) beträgt 20 °C, die mittlere Temperatur des warmen Wassers (ϑ_{in}) beträgt 36 °C. Der Wärmeverlust kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$\dot{Q}_{VL_Zuleitung} = k \cdot l \cdot (\vartheta_u - \vartheta_i) \quad (30)$$

Ungeachtet der Zapfart beträgt der Wärmeverlust der Zuleitung während der Zapfung 40 W. Weitere Wärmeverluste werden durch das in der Zuleitung verbleibende Warmwasser verursacht. Es wird angenommen, dass das Warmwasser bis zum nächsten Zapfvorgang die Temperatur der Umgebung angenommen hat. Mithilfe der folgenden Formel kann berechnet werden, dass ca. 0,77 kg Wasser in der Rohrleitung verbleiben.

$$m = V \cdot \rho = \frac{\pi}{4} d_{in}^2 \cdot l \cdot \rho \quad (31)$$

Nach jeder Zapfung gehen ca. 0,00143 kWh Wärme aus dem in der Rohrleitung verbleibenden warmen Wasser verloren. Es wird angenommen, dass die Wärmeübertragung ca. 5 min benötigt. Daraus ergibt sich eine Wärmeverlustleistung von ca. 171,6 W.

Bei der betrachteten dezentralen Warmwasserbereitstellung verursachen zwei Arten von Verlusten einen Unterschied gegenüber dem idealen Referenzprozess. Die Verluste werden durch die Wärmeverluste der Zuleitung während einer Zapfung und das in der Leitung verbleibende Warmwasser im Anschluss an eine Zapfung verursacht. Das Verhältnis zwischen dem wärmetechnischen Aufwand und dem Nutzen sind in der folgenden Abbildung als leistungsbezogener (f_{PhO}) und als mengenbezogener (F_{PhO}) PhO-Faktor dargestellt.

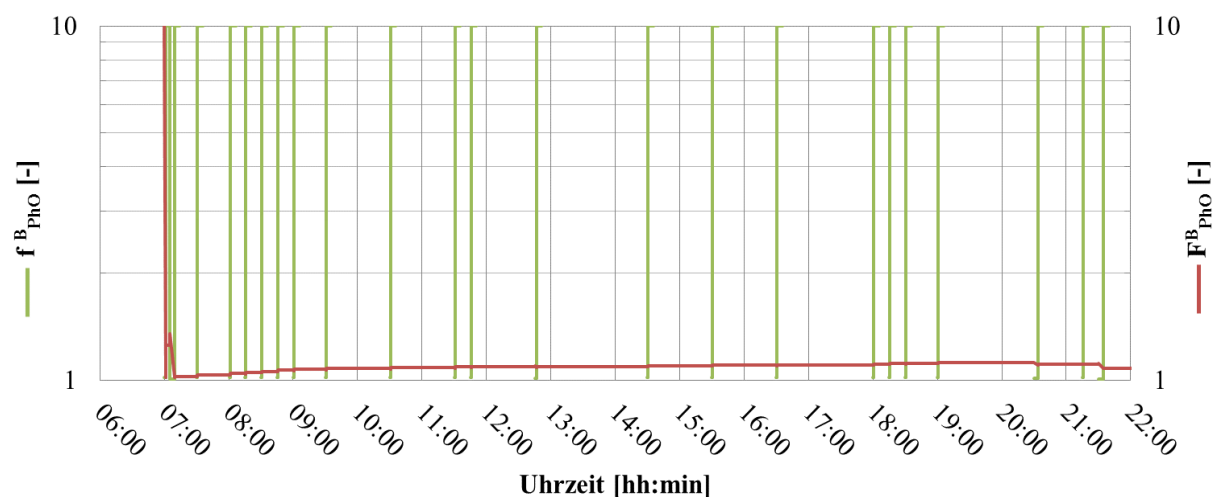


Abbildung 6-6: Leistungsbezogener und mengenbezogener PhO-Faktor einer dezentralen versorgten Warmwasserzapfung

Es ist erkennbar, dass der leistungsbezogene PhO-Faktor im Falle einer Zapfung bei ca. 1,0147 liegt. Im Anschluss an jede Zapfung strebt dieser gegen unendlich, da die Wärmeverluste zwar

einen Aufwand verursacht haben, aber kein Nutzen generiert wurde. Sobald weder Nutzen noch Aufwand vorhanden sind, findet der Prozess nicht statt. In diesem Fall ist auch der leistungsbezogene PhO-Faktor unbestimmt. Der Verlauf des mengenbezogenen PhO-Faktors aus dem Unendlichen zeigt, dass anfänglich trotz der Leitungsverluste kein sofortiger Nutzen stattfand. Der Wert schwankt in Abhängigkeit der summierten Aufwände und des Nutzens über die Anzahl der Zapfungen. Durch die effiziente Zapfung „Dusche“ am Ende des Profils fällt der über den Tag gemittelte mengenbezogene PhO-Faktor auf den Wert von ca. 1,0818.

Zentrale Wassererwärmung:

Das System der zentralen Warmwasserversorgung soll auf die Annahmen des dezentralen Systems aufbauen. Die Wärmeverluste der Zuleitung sowie die Verluste durch das in der Leitung verbleibende Warmwasser treten auch bei einer zentralen Versorgung auf. Um das Systemmodell für das Beispiel nicht zu komplex zu gestalten, wird das Modell der dezentralen Erwärmung um eine Zirkulationsleitung erweitert. Diese soll die Verbindung zwischen dem Fernwärmenetz und der Stichleitung mit einer mittleren Wassertemperatur von 45 °C repräsentieren. Die Zirkulationsleitung hat eine einfache Länge von 25 m. Die Gesamtlänge beträgt somit 50 m. Das Kupferrohr hat einen Außendurchmesser von 22 mm und eine Wandstärke von 1 mm. Der Außenmantel ist ein 10 mm starker Elastomerschaum. Unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen bei der Berechnung der dezentralen Versorgung wird der Wärmedurchgangskoeffizient auf 0,25 W/m² K gerundet. Die Wärmeverluste der Zirkulationsleitung betragen 312,5 W. Die Wärmeübertragung zwischen Zirkulations- und Stichleitung sowie Fernwärmenetz und Zirkulationsleitung werden als verlustfrei angenommen. Die Verluste des Fernwärmenetzes oder eines möglichen Wärmespeichers werden nicht betrachtet. Das Verhältnis zwischen dem wärmetechnischen Aufwand und Nutzen einer zentral versorgten Zapfstelle sind in der folgenden Abbildung als leistungsbezogener (f_{PhO}) und als mengenbezogener (F_{PhO}) PhO-Faktor aufgetragen.

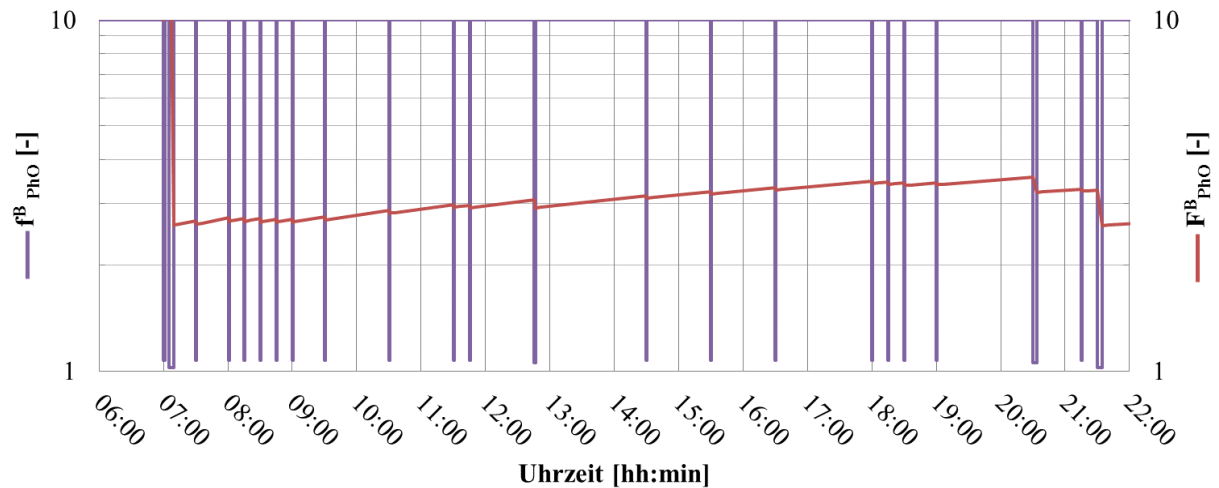


Abbildung 6-7: Leistungsbezogener und mengenbezogener PhO-Faktor einer zentral versorgten Warmwasserzapfung

Vergleichbar zur dezentralen Versorgung strebt der leistungsbezogene PhO-Faktor, ausgenommen zur Zeit einer Zapfung, gegen unendlich. Allerdings verursachen die Wärmeverluste der Zirkulationsleitung dauerhafte Aufwände, so dass der Prozess auch zwischen den Zapfungen definiert ist. Im Falle einer Zapfung beträgt der leistungsbezogene PhO-Faktor ca. 1,0723, mit Ausnahme des Zapftyps Duschen. Dort beträgt er ca. 1,0217. Der mengenbezogene PhO-Faktor ist vor der ersten Zapfung unendlich, fällt dann auf den Tiefstwert von ca. 2,5937 ab. Die geringen Zapfmengen und langen Intervalle zwischen den Zapfungen führen dazu, dass der Faktor auf den Tageshöchstwert von ca. 3,5719 ansteigt. Als Tagesmittelwert beträgt der mengenbezogene PhO-Faktor ca. 2,7663. Abbildung 6-8 zeigt vergleichend die Verläufe der leistungs- und mengenbezogenen PhO-Faktoren einer zentralen und dezentralen Warmwasserzapfung.



Abbildung 6-8: Verlauf der leistungs- und mengenbezogenen PhO-Faktoren einer zentralen und dezentralen Warmwasserversorgung unter Berücksichtigung des Zapfprofils

Für eine ganzheitliche Bewertung müssten die Systemgrenzen erweitert und weitere aufgewendete Energieformen und Ressourcen in die Betrachtung einfließen. Dazu gehören der Bedarf an Wasser, an elektrischer Energie für den Betrieb von Pumpen usw., die Verluste durch die Übertragung von Wärme, die Verluste bei der Wandlung von Energie sowie die anlagenspezifischen Kennlinien. Allerdings ist für diesen Prozess keine **ganzheitliche Bewertung** angedacht.

Das Beispiel zeigt, dass durch die sowohl leistungs- als auch mengenbezogene Bewertung optimale **Betriebszustände identifiziert** und **Maßnahmen abgeleitet** werden können. Die leistungsbezogenen Verläufe zeigen, dass die Effizienz der Systeme während einer Zapfung sehr gut zu bewerten ist. Diese Leistungskennzahl repräsentiert die momentane Güte des Prozesses und des Systems. Sobald der PhO-Leistungsfaktor gegen unendlich strebt, wird ohne einen erforderlichen Nutzen ein Aufwand betrieben. Der Prozess sollte somit unterbrochen werden, bis ein Nutzen erneut von Nöten ist. In Abhängigkeit des Systems kann es jedoch sinnvoll sein, auf eine Abschaltung des Systems sowie evtl. damit verbundenen hohen Wiederanfahrtaufwände zu verzichten. Der mengenbezogene PhO-Faktor ermöglicht es alle

Einflüsse auf die Aufwände und Nutzen über einen vergleichbaren Zeitraum zu bewerten. An dem dargestellten Beispiel ist der über einen Tag gemittelte mengenbezogene PhO-Faktor des zentralen Systems ca. 2,55-mal größer als der des zentral versorgenden Systems. In diesem Fall wäre eine dezentrale Warmwasserversorgung einer zentralen Versorgung vorzuziehen.

Bei der Bewertung von Prozessen sind beide Arten von Faktoren zu berücksichtigen. Der leistungsbezogene PhO-Faktor ist hilfreich zur Verbesserung der Prozesse und Identifikation von ineffizienten Zuständen. Für eine Bewertung des Zusammenhangs von Prozess und System sowie für den Vergleich der Effizienz von Systemen ist der mengenbezogene PhO-Faktor anzuwenden.

6.1.2 Bilanzielle Prozessbewertung aus der Verbrauchsperspektive

Prozesse, die chemisch gebundene Energie eines Brennstoffs in thermische Energie wandeln, sind typische **Verbrauchsprozesse**. Eine grobe Analyse des Prozesses zeigt, dass zur Bereitstellung von Endenergie u.a. Primärenergieträger oder Sekundärenergieträger verbraucht werden (siehe Abbildung 6-9).

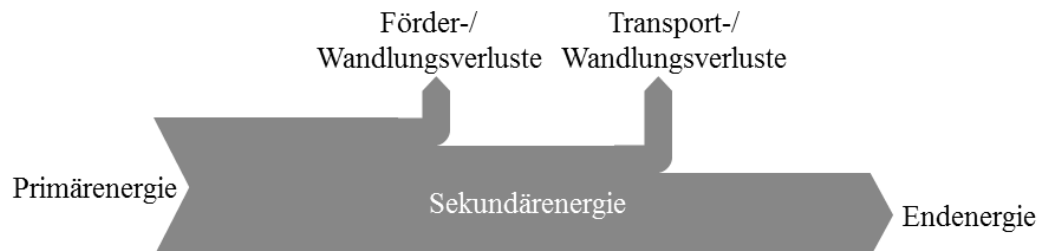
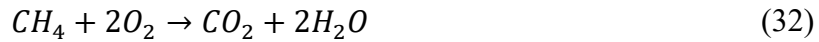


Abbildung 6-9: Wandlung von Primär- und Sekundärenergie in Endenergie

Der **betrachtete Prozess** soll die Verbrennung von Erdgas zur Bereitstellung von Wärme behandeln. Das **System** berücksichtigt lediglich den Verbrennungsprozess. Vorgelagerte Prozesse zur Gewinnung von Erdgas sowie die nachgelagerten Prozesse zur Wandlung der Endenergie in Nutzenergie werden nicht beachtet. Das System ist vergleichbar mit den typischen Liefergrenzen einer technischen Wärmeversorgung eines öffentlichen oder industriellen Standortes. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass das Erdgas aus reinem Methan besteht und der Prozess unter Normbedingungen stattfindet. Als **Aufwand** wird die Wärme (Q_{PhO}) festgelegt, die auf Grund der exothermen Oxidation des Brennstoffs und unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen in einem idealen Verbrennungsprozess nutzbar wäre. Als **Nutzen** wird die real bereitgestellte Wärme (Q) festgelegt.

Für den **idealen Referenzprozess** wird angenommen, dass sowohl die Edukte als auch die Produkte der Verbrennung bei Normbedingungen vorliegen. Die Verbrennung kann im idealen Fall mit einem stöchiometrischen Luftverhältnis stattfinden. Die **ideale Verbrennung** von Methan kann durch die folgende Reaktionsgleichung dargestellt werden.



Ein Mol Methan reagiert mit 2 Mol Sauerstoff zu einem Mol Kohlenstoffdioxid und 2 Mol Wasser. Unter Berücksichtigung der molaren Massen verbrennt 1 kg Methan mit reinem Sauerstoff zu 2,75 kg Kohlenstoffdioxid und 2,25 kg Wasser.

Zur Berechnung der Verbrennungswärme können die Standardbildungsenthalpien der Edukte von den Standardbildungsenthalpien der Produkte subtrahiert werden. Das Ergebnis ist die Standardverbrennungsenthalpie. Als praktikable Kennzahl der Thermodynamik enthalten Tabellenwerke für typische Brennstoffe den Betrag der Standardverbrennungsenthalpie als sogenannten Brennwert (H_s). Bei Berechnungen unter Verwendung des Brennwertes liegt das an der Verbrennung beteiligte Wasser, als Feuchte der Edukte und als Reaktionsprodukt, in flüssiger Form vor. Die Kondensationswärme des Wassers wird der nutzbaren Verbrennungswärme unter Berücksichtigung des Normzustandes gutgeschrieben. Wenn die Edukte und Produkte des Prozesses unter Standardbedingungen vorliegen und der Prozess unter Standardbedingungen stattfindet, kann im idealen Fall der Brennwert des Brennstoffes vollständig als Verbrennungswärme genutzt werden (siehe Formel 33).

$$Q_{PhO} = m_{\text{CH}_4} \cdot H_{s,\text{CH}_4} \quad (33)$$

Weicht der Prozess von den Standardbedingungen ab, muss die durch die Edukte und Produkte über die Systemgrenzen transportierte Wärme als Differenz zu dem maximal nutzbaren Brennwert angerechnet werden. Diese Wärme kann durch den Massenstrom, die spezifische Wärmekapazität und die Temperaturdifferenz zu den Prozessbedingungen berechnet werden. Edukte, der Brennstoff und das Oxidationsmittel, die wärmer als die Prozesstemperatur ($\Delta T_E = \vartheta_{\text{Prozess}} - \vartheta_{\text{Edukte}} < 0$) sind, verursachen einen Wärmestrom in das System. Produkte, die trockenen Rauchgase und das kondensierte Reaktionsprodukt Wasser, die wärmer als die Prozesstemperatur ($\Delta T_{\text{RG}} = \vartheta_{\text{RG}} - \vartheta_{\text{Prozess}} > 0$ oder $\Delta T_{\text{Kon}} = \vartheta_{\text{Kon}} - \vartheta_{\text{Prozess}} > 0$) sind, verursachen einen Wärmestrom aus dem System. Diese Wärmeströme müssen für die Berechnung des idealen Referenzprozesses berücksichtigt werden. In diesem idealen Beispielfall wird unter stöchiometrischen Verhältnissen mit Luft verbrannt. Die Produkte sind somit die minimale

Menge an trockenem Rauchgas ($m_{RG,tr,min}$) sowie Kondensat ($m_{Kon,min}$). Die folgende Formel berücksichtigt die maximal nutzbare Prozesswärme:

$$Q_{PhO} = m_{CH_4} \cdot H_{S,CH_4} - m_E \cdot c_{p,E} \cdot \Delta T_E - m_{RG,tr,min} \cdot c_{p,RG,tr} \cdot \Delta T_{RG} - m_{Kon,min} \cdot c_{p,Wasser} \cdot \Delta T_{Kon} \quad (34)$$

Für den gewählten idealen Prozess ist die Prozesstemperatur gleich der Umgebungstemperatur ($\vartheta_{RG} = \vartheta_{Kon} = \vartheta_p$). Die Wärme des Rauchgases und des Kondensates kann in diesem Fall bis zu der Umgebungstemperatur vollständig genutzt werden. Der Wärmestrom der Edukte über die Systemgrenze ist Null. Die Wärmeverluste durch einen Wärmestrom des Rauchgases sind im idealen Fall ebenfalls Null. Die nutzbare Verbrennungswärme des idealen Referenzprozesses kann mit Hilfe der Formel 33 berechnet werden.

Der Brennwert des Brennstoffs wird im idealen Fall vollständig genutzt. Unter technischen Normbedingungen ($\vartheta_N=25\text{ °C}$) können durch Verbrennung von einem Kilogramm Methan in diesem idealen Referenzprozess ca. 55,498 MJ (vgl. Grote et al. 2011), entspricht ca. 0,0154 kWh, Wärme genutzt werden. Das Modell des idealen Prozesses ermöglicht es, die möglichen Verluste auszuschließen und die maximal nutzbare Wärme bilanziell zu bestimmen.

In realen Verbrennungsprozessen führen vor allem feuerungstechnisch und apparatetechnisch bedingte Verluste dazu, dass die im Brennstoff gebundene Energie nicht vollständig als Wärme genutzt werden kann. Aus feuerungstechnischen Gründen werden Verbrennungen unter überstöchiometrischen Bedingungen betrieben. Diese Fahrweise soll eine vollständige Verbrennung des Brennstoffes gewährleisten. Die Vermischung von Brennstoff und Oxidationsmittel hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf den Ablauf der Verbrennung. In der Regel sind Brennstoffe keine Reinstoffe. Neben einer schwankenden Zusammensetzung, die veränderliche Energiegehalte bewirkt, werden bei der Verbrennung feste Rückstände gebildet, deren Energie kaum nutzbar ist. Durch apparative Bedingungen sind Wärmeverluste eines Feuerraums unvermeidbar. Ein Teil der nutzbaren Energie geht somit bereits während des Verbrennungsprozesses verloren. Darüber hinaus können in realen Prozessen aus technischer und wirtschaftlicher Sicht die theoretischen thermodynamischen Möglichkeiten der Wärmeübertragung nicht ausgereizt werden. Eine vollständige Nutzung der Verbrennungswärme ist daher nicht möglich. Feuerungen werden in der Regel mit Überkapazitäten ausgelegt und realisiert. Eine Folge ist u.a. ein ineffizienter Betrieb durch Taktung. Das übermäßige An- und Abfahren der Feuerung verursacht vermeidbare Verluste.

Obwohl die Wärmeübertragung im Teillastfall verbessert werden kann, ist die Gesamtbetriebsweise des Systems zu berücksichtigen. Die grundlastgebunden periphere Ausstattung des Kessels und des angeschlossenen Wärmekreises führt trotz eines stationären Teillastverhaltens in der Regel zu einem ineffizienten Betrieb.

Für reale Prozesse ist es auf Grund der Komplexität von Feuerungsprozessen u.U. nicht möglich, Modelle aufzustellen, die eine Berechnung der vielseitigen realen Verluste exakt ermöglichen. Allerdings kann die im Rauchgas enthaltene oder die als Endenergie nutzbare Wärme durch Messungen bestimmt werden.

Als vereinfachter realer Prozess wird angenommen, dass die Feuerung eingangsseitig unter Normbedingungen betrieben wird, eine vollständige Nutzung der Wärme ausgangsseitig bis zur Umgebungsbedingung allerdings nicht möglich ist. Das Rauchgas kann apparatbedingt nur bis zu einer Rauchgastemperatur (ϑ_{RG}) von 100 °C abgekühlt werden. Die für die Erwärmung der Edukte notwendige Wärme wird in dem Prozess nicht durch das Abkühlen auf den Ausgangszustand zurückgewonnen. Es erfolgt somit keine Kondensation des im Rauchgas enthaltenen Wassers. Für die Berechnung der nutzbaren Energie wird der Heizwert von Methan mit ca. 47,486 MJ/kg (vgl. Grote et al. 2011), entspricht ca. 0,0132 kWh/kg, verwendet. Des Weiteren ist die für die Erwärmung der Edukte erforderliche Wärmemenge von der nutzbaren Wärmemenge abzuziehen. Die Verbrennung wird leicht überstöchiometrisch ($\lambda = 1,1$) betrieben. Unter der Annahme, dass sich die Edukte wie ideale Gase verhalten, verbrennt 1 kg Methan (m_{CH_4}) mit 4 kg Sauerstoff, der in ca. 18,81 kg überstöchiometrischen Menge Luft (m_{Luft}) enthalten ist. Die Erwärmung der nötigen Edukte, Methan und Luft, auf die minimale Rauchgastemperatur muss als Verlust berücksichtigt werden. Die durch die Temperaturerhöhung (ΔT) um 75 K von 25 °C auf 100 °C aufgenommene Wärme der Edukte wird von der maximal nutzbaren Wärme subtrahiert. Die mittlere Wärmekapazität von Luft ($c_{p,Luft}$) beträgt 1,00895 kJ/kg K (vgl. Martin et al., S. Dbb2). Die Wärmekapazität von Methan beträgt ca. 2,177 kJ/kg K (vgl. Grote et al. 2011, S. D46). Die Verlustwärme kann mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$Q_{Edukte} = (m_{CH_4} \cdot c_{p,CH_4} + m_{Luft} \cdot c_{p,Luft}) \cdot \Delta T \quad (35)$$

Dieser Verlust beträgt je kg verbranntem Methan ca. 1,587 MJ (ca. 0,0004 kWh). Der Prozess wird stationär im Vollastfall betrieben. Verluste durch An- und Abfahren sowie durch das Teillastverhalten sind daher ausgeschlossen. Als Wärmeverlust durch ungenügende Isolierung

werden 5 % der ideal nutzbaren Wärme angenommen. Die Isolationsverluste (Q_{trans}) betragen dann ca. 2,775 MJ (ca. 0,0008 kWh). Die im realen Fall maximal nutzbare Wärme bei der Verbrennung von reinem Methan und unter Berücksichtigung der Annahmen kann nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$Q_{real} = m_{CH_4} \cdot H_{i,CH_4} - Q_{Edukte} - Q_{trans} \quad (36)$$

In dem realen Prozess sind demnach maximal 43,124 MJ (ca. 0,0112 kWh) als Wärme bei der Verbrennung von einem Kilogramm Methan nutzbar. Die Bewertung der Effizienz des Prozesses erfolgt mit dem mengenbezogenen PhO-Faktor (siehe Formel 37).

$$F_{PhO,Verbrennung} = \frac{Q_{Nutz}}{m_{CH_4} \cdot H_{S,CH_4}} \quad (37)$$

Der Quotient aus der in dem realen Prozess maximal nutzbaren Wärme von 43,124 MJ/kg_{CH₄} und dem idealen Aufwand von 55,498 MJ/kg_{CH₄} beträgt ca. 0,777. Abbildung 6-10 zeigt die erweiterte Verlustkaskade des Verbrennungsprozesses.

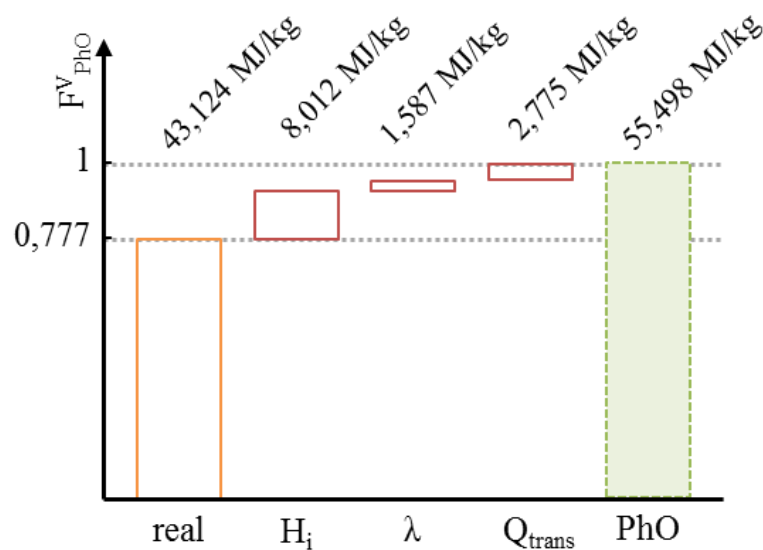


Abbildung 6-10: Erweiterte Verlustkaskade des Verbrennungsprozesses

Anhand der Analyse können mehrere **Zielstellungen** verfolgt werden. Das vorrangige Ziel ist die Planung von Verbesserungsmaßnahmen an der bestehenden Feuerung. Die Bewertung aus der Verbrauchsperspektive zeigt, welches Potential in dem bezogenen Brennstoff steckt. Die erweiterte Verlustkaskade zeigt die jeweiligen Verluste des realen Prozesses gegenüber dem idealen Fall und erlaubt eine gezielte Planung und Bewertung von Maßnahmen zur Minderung

der jeweiligen Defizite. Darüber hinaus kann mit Hilfe der Analyse aus der Verbrauchsperspektive die Verwendung alternativer Wandlungstechnologien geprüft werden. Die ideale im Brennstoff vorhandene maximal nutzbare Energie ermöglicht einen Vergleich der unterschiedlichen Technologien unter Berücksichtigung eines einheitlichen Bezugswertes.

Diese Form der Bewertung ist sowohl an Techniker als auch an Ökonomen **adressiert**. Da sich der einheitenlose PhO-Faktor auf die zur Masse des Brennstoffes äquivalente Energiemenge bezieht, kann der PhO-Faktor auch auf die für das Gas typischen Abrechnungseinheiten Nm^3 oder kWh übertragen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Energiedichte nicht durch veränderte Umgebungsbedingungen oder einen veränderten Brennwert variiert. Ein Indikator dafür wäre, eine Veränderung der Effizienz eines bekannten Prozesszustandes.

Für Verbrauchsprozesse ist neben den einheitenlosen PhO-Faktoren eine **einheitenbehaftete Faktorisierung** zur Verknüpfung unterschiedlicher Sichtweisen auf den Prozess förderlich. Aus ökologischer Sicht könnte das die genutzte Energie im Verhältnis zur emittierten Menge an CO_2 , beispielsweise MWh/tCO_2 , sein. Aus ökonomischer Sicht wäre der Faktor für genutzte Energie und Kosten für Erdgas, also $\text{MWh}/\text{€}$, zu betrachten. Die Grundlage für solche übergreifenden Bewertungen wird durch den Bezug auf den idealen Referenzprozess ermöglicht.

Für die **ganzheitliche Bewertung** rückt der Nutzen des Verbrauchsprozesses, Endenergie in Form von Wärme bereitzustellen, in den Fokus. Der Nutzen könnte durchaus mit alternativen Energiequellen oder Energieträgern generiert werden. Dazu müssten die Vorketten in der Bewertung integriert werden. Eine gute Orientierung bietet Primärenergiefaktoren (PEF) (vgl. DIN V 18599-1 2011). Diese berücksichtigen alle Schritte der Primärenergieerzeugung, u.a. die Vorketten, die zur Förderung, Aufbereitung, Umwandlung, den Transport und die Verteilung des jeweiligen Energieträgers nötig sind. Durch eine Umstellung von Erdgas (PEF = 1,1) auf beispielsweise Braunkohle (PEF = 1,2) wäre die Effizienz der Verbrennung unter Berücksichtigung der Vorketten ca. 9 % schlechter.

Eine ganzheitliche Bewertung setzt die Berücksichtigung der Einflüsse durch das System voraus. Die Effizienz der an die Feuerung anschließenden Komponenten, u.a. zur Wärmeübertragung, zur Wärmespeicherung und Wärmeverteilung, können ein ineffizientes Teillastverhalten der Feuerung und vermehrtes An- bzw. Abfahren verursachen. Die leistungsbezogene Analyse identifiziert dann sowohl **optimale Betriebszustände** des

Verbrauchsprozesses, als auch des gesamten Systems. Neben apparativer und anlagentechnischer Maßnahmen kann eine verbesserte Steuerung die Effizienz des Prozesses erhöhen. Die Bewertung der Maßnahmen erfolgt dann durch die mengenbezogene Betrachtung, mit dem Ziel der Effizienzsteigerung durch die Maximierung des Prozessnutzens.

6.2 Bewertung der Prozesskapazität

Die apparative bzw. anlagentechnische Umsetzung gewünschter Prozesse kann nur im Rahmen der technischen Möglichkeiten erfolgen. Diese beruhen wiederum auf getroffenen Annahmen sowie den gewählten Auslegungsmodellen, die die realen Prozessbedingungen und -abläufe möglichst vereinfacht darstellen, um eine ingenieurtechnische Auslegung zu ermöglichen. Darüber hinaus muss der angedachte Nutzen sichergestellt sein. Bei der Realisierung von Prozessen ist es daher üblich, zusätzliche Sicherheiten zu berücksichtigen. Die Folge ist u.U., dass Apparate mit Überkapazitäten ausgeführt werden. Im Laufe des Betriebes unter den angedachten Bedingungen, der Erzielung des gewünschten Nutzens und ausreichend Erfahrung über die Stabilität des Prozesses, kann es im Interesse des Betreibers sein, diese Überkapazität zur Steigerung der Effizienz des Prozesses zu nutzen. Dabei würde eine bilanzielle Bewertung der Prozesse entsprechend deren Auslegungsfall immer zu einem minimalen PhO-Faktor von Eins führen. Darüber hinaus würde beispielsweise die Bilanz eines idealen Übertragungsprozesses einen idealen Apparat voraussetzen, was eine unendliche Übertragungsfläche zur Folge hätte. Um dennoch die Überkapazitäten zu berücksichtigen, muss die Betrachtungsweise grundlegend geändert werden.

Einfluss der Sicherheit auf das Leistungsvermögen

Wärmeübertragungsapparate sind ein geeignetes Beispiel zur grenzwertorientierten Bewertung dieser Überkapazitäten. Bestehende Wärmeübertragungsapparate sollen die gezielte Temperierung eines Mediums durch die Übertragung von Wärme auf ein zweites Medium sicherstellen. Es wird die indirekte Übertragung in einem Rekuperator betrachtet. Aus dem Massenstrom des zu temperierenden Mediums, dessen ursprüngliche Temperatur und dessen Zieltemperatur, kann unter Verwendung der Formel 25 die erforderliche Wärmeleistung bestimmt werden. Das zweite Medium muss wiederum in der Lage sein, diese Wärme aufzunehmen. Neben dem bilanziellen Vermögen der beteiligten Medien Wärme aufzunehmen bzw. abzugeben, beeinflusst das Transportverhalten die Wärmeübertragung maßgeblich. Die

Strömungsbedingungen an den Übertragungsflächen sind hier entscheidend für die realisierbare Energieübertragung.

Im Rahmen der Auslegung eines Wärmeübertragungsapparates wird unter Berücksichtigung der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz ($\Delta\vartheta_m$), der notwendigen Wärmeleistung (\dot{Q}) sowie der strömungstechnischen und geometrischen Bedingungen des Apparates in Form des Wärmedurchgangskoeffizienten (k) die minimal erforderliche Austauschfläche festgelegt (siehe Formel 38). Diese Fläche entspricht der für den idealen Prozess notwendigen Übertragungsfläche (A_{PhO}).

$$\dot{Q}_{PhO} = k_{PhO} \cdot A_{PhO} \cdot \Delta\vartheta_m \quad (38)$$

Auf Grund der im Betrieb auftretenden Verschmutzung der Übertragungsfläche wird der Wärmedurchgang verschlechtert. Um dennoch die geforderte Übertragungsleistung sicherzustellen, wird bei der Auslegung der minimal erforderlichen Fläche (A_{PhO}) eine zusätzliche Übertragungsfläche zur Berücksichtigung der Verschmutzung (A_{VS}) sowie eine Übertragungsfläche (A_S) die Unsicherheiten in der Auslegung kompensieren soll zugefügt (siehe Abbildung 6-11). Diese Flächen können auf Basis der minimalen Übertragungsfläche, dem Verschmutzungsbeiwert und den Sicherheitszuschlägen berechnet werden.

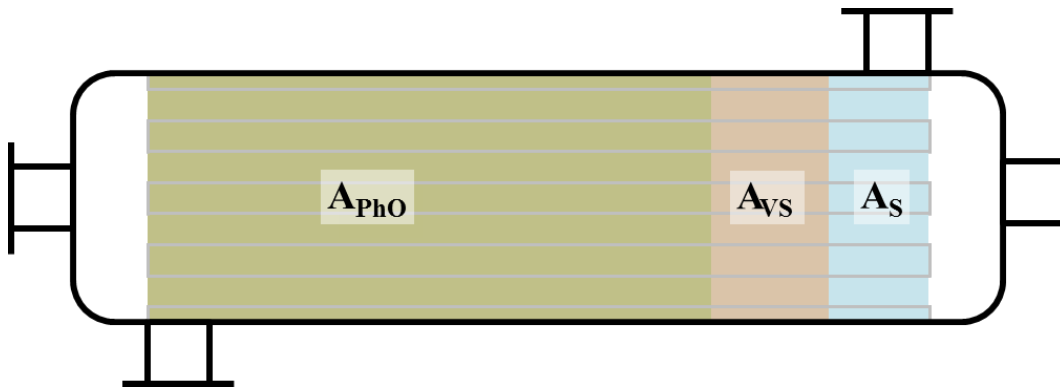


Abbildung 6-11: Zusammensetzung der Übertragungsflächen eines Wärmeübertragungsapparates

In der Regel haben reale Wärmeübertragungsapparate, anlässlich dieser Sicherheiten, ungenutztes Potential oder Kapazität mehr Wärme zu übertragen als ursprünglich gefordert. Diese Überdimensionierung führt dazu, dass Übertragungsprozesse, die entsprechend der Auslegungsparameter betrieben werden, abweichende Auslasstemperaturen aufweisen. Am Beispiel eines Wärmeübertragungsapparates mit vorgegebenen Eingangsparametern wird der Einfluss des Sicherheitsfaktors auf die Ausgangstemperaturen der Medien berechnet. Die

Vergrößerung der Gesamtfläche (A_{ges}) als Produkt der idealen Fläche (A_{PhO}) und dem Sicherheitsfaktor (S) ermöglicht es, im idealen Betrieb, unter gleichen Strömungsbedingungen und gleichen Medienzuständen am Eingang einen größeren Wärmestrom als den im minimalen Auslegungsfall zu übertragen.

Durch iterative Auslegung werden die Änderung der Auslasstemperatur durch Überdimensionierung oder Sicherheiten bestimmt. Folgender Prozess liegt der Auslegung zu Grunde: Es sollen 3,5 m³/h Wasser von 60 °C auf 40 °C abgekühlt werden. Der abzuführende Wärmestrom kann wie folgt berechnet werden:

$$\dot{Q}_{PhO} = \dot{m}_1 \cdot c_{p,1} \cdot (T_{1,1} - T_{1,2}) = 0,97 \frac{kg}{s} \cdot 4,18 \frac{kJ}{kgK} \cdot 20K = 81,092 kW \quad (39)$$

Dazu steht ein Kühlwasserstrom von 7 m³/h mit einer Temperatur von 15 °C zur Verfügung. Der Apparat mit einem Mantelrohrdurchmesser von 300 mm überträgt die Wärme im Gegenstrom. Das Warmwasser wird durch 85 Rohre mit Außendurchmesser von 30 mm und einem Innendurchmesser von 24 mm geleitet. Der optimale Wärmedurchgangskoeffizient (k_{PhO}) für diese Strömungsbedingungen ohne Berücksichtigung der Verschmutzung wird auf 73,329 W/m²K festgelegt. Die detaillierte Herleitung basierend auf den apparatetechnischen und prozessspezifischen Bedingungen sowie unter Verwendung der Methodik im VDI-Wärmeatlas (vgl. Martin et al. 2005) erfolgt analog des Beispiels von Schneider et.al (siehe Schneider et al. 2016, Anhang 1) Mit der mittleren logarithmischen Medientemperatur ($\Delta\vartheta_m$) von 29,72 K kann die minimal erforderliche Austauschfläche (A_{PhO}) berechnet werden:

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_{gr} - \Delta\vartheta_{kl}}{\ln \frac{\Delta\vartheta_{gr}}{\Delta\vartheta_{kl}}} = \frac{(60 - 25)K - (40 - 15)K}{\ln \frac{(60 - 25)K}{(40 - 15)K}} = 29,72 K \quad (40)$$

$$A_{PhO} = \frac{\dot{Q}_{PhO}}{k_{PhO} \cdot \Delta\vartheta_m} = 37,208 m^2 \quad (41)$$

Unter Berücksichtigung der Rohrquerschnitte ergibt sich eine Rohrlänge von 4,645 m. Basierend auf Sicherheitszuschlägen kann diese Rohrlänge und damit die Austauschfläche vergrößert werden. Die Gesamtfläche (A_{ges}) ist das Produkt aus der idealen Übertragungsfläche und dem Sicherheitsfaktor (S).

$$A_{ges} = A_{PhO} \cdot S \quad (42)$$

Die mit einer Sicherheit versehenen Übertragungsflächen sind bei gleichen Strömungsbedingungen in der Lage, mehr Wärme zu übertragen.

$$\dot{Q}_i = k_{PhO} \cdot A_{PhO} \cdot S_i \cdot \Delta\vartheta_m \quad (43)$$

Mittels des möglichen Wärmestroms kann die Ausgangstemperatur der beiden Medien berechnet werden:

$$T_{1,2} = T_{1,1} - \frac{\dot{Q}_i}{\dot{m}_1 \cdot c_{p,1}} \quad (44)$$

$$T_{2,2} = T_{2,1} - \frac{\dot{Q}_i}{\dot{m}_2 \cdot c_{p,2}} \quad (45)$$

Die neuen Ausgangstemperaturen können in Formel 40 eingesetzt und mit Formel 43 der neue Wärmestrom berechnet werden. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt, bis die Differenz der mittleren logarithmischen Medientemperatur unterhalb eines vertretbaren Maßes liegt. Tabelle 2 zeigt, welche reale maximale Wärmeleistung durch die vergrößerte Übertragungsfläche bei gleichen Eingangsströmen und -temperaturen übertragen werden könnte.

Tabelle 2: Änderung der realen maximalen Wärmeleistung durch Sicherheiten behaftete Wärmeübertragungsflächen

S	\dot{Q}_{PhO}	\dot{Q}_{real}	f_{PhO}
[-]	[W]	[W]	[-]
1,05	81089,49	83696,19	1,032
1,10	81089,49	86213,98	1,063
1,15	81089,49	88648,26	1,093
1,20	81089,49	91005,48	1,122
1,25	81089,49	93294,36	1,151
1,35	81089,49	97728,25	1,205

Die Steigerung der im realen Fall übertragenen Wärmeleistung ist linear zu der Vergrößerung der Übertragungsfläche durch den Sicherheitszuschlag. Der PhO-Faktor des Wärmeübertragungsapparates für den stationären Betrieb im Auslegungsfall errechnet sich daher aus der realen sicherheitsbehafteten übertragbaren Wärmeleistung und der ideal

notwendigen Wärmeleistung (siehe Formel 46). Die PhO-Faktoren für das Rechenbeispiel sind in Tabelle 2 in Abhängigkeit der Sicherheitszuschläge dargestellt.

$$f_{PhO} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{PhO}} \quad (46)$$

Die Steigerung der realen Übertragungsleistung führt bei dem gewählten Beispiel und gleichen Medienströmen dazu, dass die Ausgangstemperaturen der Medien gegenüber dem Auslegungsfall sinken. λ Tabelle 3 zeigt den Einfluss der Sicherheitszuschläge auf die Medienausgangstemperaturen bei unveränderten Eingangsbedingungen.

λ Tabelle 3: Änderung der Medienausgangstemperatur durch Sicherheitszuschläge bei Wärmeübertragungsapparaten

S	T _{1,1}	T _{1,2}	T _{2,1}	T _{2,2}
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1,00	60,00	40,00	15,00	25,00
1,05	60,00	39,36	15,00	25,32
1,10	60,00	38,74	15,00	25,63
1,15	60,00	38,14	15,00	25,93
1,20	60,00	37,55	15,00	26,22
1,25	60,00	36,99	15,00	26,51
1,35	60,00	35,90	15,00	27,05

In Abbildung 6-12 ist die Änderung der Ausgangstemperaturen durch die vergrößerte Übertragungsfläche grafisch dargestellt.

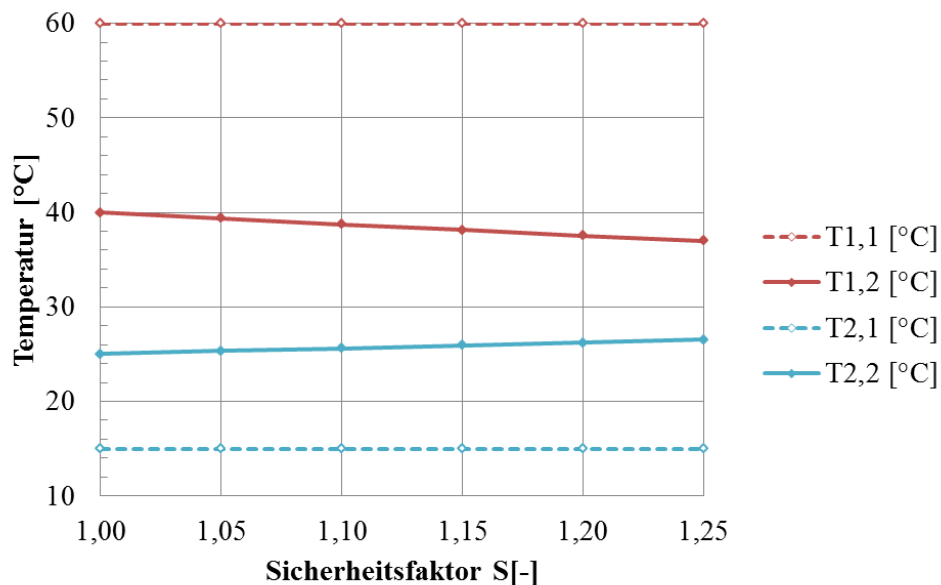


Abbildung 6-12: Änderung der Ausgangstemperaturen durch die Vergrößerung der Übertragungsfläche

Geringere Temperaturen an den Austritten des Wärmeübertragungsapparates könnten bei gleichen Eingangsbedingungen ein Indiz für ein ungenutztes Potential sein. Eine Temperaturerhöhung hingegen ist ein Anzeichen für eine ineffiziente Wärmeübertragung.

Mit Hilfe der grenzwertorientierten Methode ist es also möglich, die Effektivität eines Prozesses unter Berücksichtigung dessen Kapazität zu bewerten.

Nutzung der Überdimensionierung zur Steigerung der Effektivität

Die Kenntnis über vorhandene Kapazitäten weckt das Interesse, diese für die Steigerung des realisierbaren Effekts zu nutzen. Auf Basis des Beispiels des Wärmeübertragungsapparates wird daher die ideale Wärmeleistung der sicherheitsbehafteten Übertragungsfläche analysiert. Als Prozessgrenzen werden die Eingangs- und Ausgangstemperaturen der Medien äquivalent des idealen Prozesses festgelegt. Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz ist mit 29,72 K die des idealen Prozesses. Unter Verwendung von Formel 43 wird die ideal übertragbare Wärmeleistung der sicherheitsbehafteten Übertragungsfläche berechnet. Tabelle 4 zeigt, welche Wärmeleistung unter Berücksichtigung des Sicherheitszuschlages unter idealen Auslegungsbedingungen übertragen werden kann. Aus der gesteigerten Übertragungskapazität resultiert ein erhöhter Wärmestrom der beiden Medien. Mit Formel 39 kann der sich daraus ergebende Massenstrom der Medien berechnet werden. Die Massenströme im Fall der genutzten Übertragungskapazität ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Änderung der idealen Übertragungsleistung in Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors

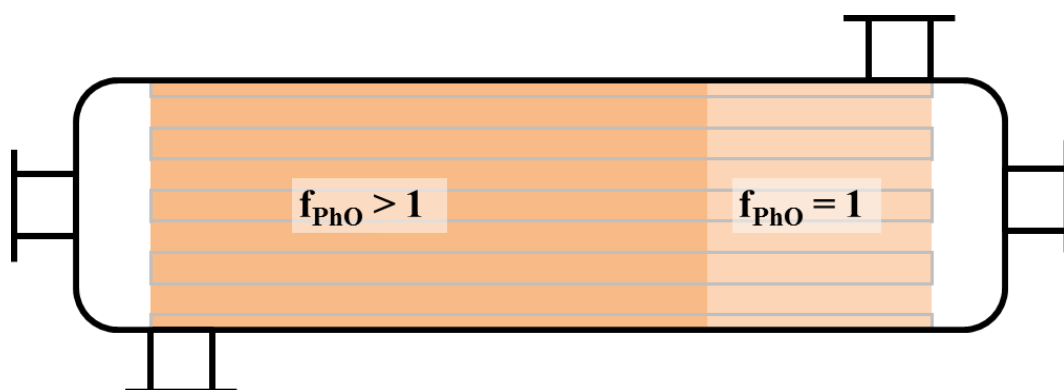
S	[-]	1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,35
$\dot{Q}_{PhO,S}$	[W]	81.089,49	85.143,97	89.198,44	93.252,92	97.307,39	10.1361,87	10.9470,81
$\dot{m}_{1,S}$	[kg/h]	3.491,89	3.666,49	3.841,08	4.015,68	4.190,27	4.364,87	4.714,05
$\dot{m}_{2,S}$	[kg/h]	6.982,11	7.331,22	7.680,33	8.029,43	8.378,54	8.727,64	9.425,85

Daraus ergeben sich durch die Vergrößerung der Übertragungsfläche bei gleichen Strömungsbedingungen höhere Übertragungsleistungen. Tabelle 5 enthält sowohl die absolute als auch die relative Steigerung der Leistung durch Ausnutzung der Kapazität des Wärmeübertragungsapparates im Vergleich zum idealen Fall.

Tabelle 5: Steigerung der absoluten und relativen Übertragungsleistung durch Ausnutzung der Überdimensionierung

S	[-]	1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,35
$\Delta\dot{Q}_{S,abs}$	[W]	0,00	4.054,47	8.108,95	12.163,42	16.217,90	20.272,37	28.381,32
$\Delta\dot{Q}_{S,rel}$	[%]	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	35,00

Die dauerhafte Verschiebung des Betriebspunktes zur Nutzung der thermodynamischen Überkapazität des Wärmeübertragungsapparates macht eine Neubewertung des idealen Referenzzustandes notwendig. Durch die gezielte Verwendung der sicherheitsbedingten Flächen steigt die ideale Kapazität des Apparates. Die ideale Kapazität nähert sich der real verfügbaren Kapazität. Der apparative PhO-Faktor erreicht als Minimum den Idealwert von Eins (siehe Abbildung 6-13).

**Abbildung 6-13: Ideale Kapazität eines bestehenden Wärmeübertragungsapparates**

Die Methode der grenzwertorientierten Bewertung ermöglicht es, das Leistungsvermögen von bestehenden Apparaten und Anlagen auf Basis deren realer und idealer Kapazität zu ermitteln.

Die Wirkungen von Verbesserungsmaßnahmen können in Form des apparatespezifischen PhO-Faktors dargestellt werden

Die ganzheitliche Bewertung des mit dem Apparat bezweckten Prozesses setzt wiederum eine bilanzielle Betrachtung aller daran beteiligten Ressourcenströme voraus. So erfordert die Erhöhung der Wärmeübertragungsleistung unter konstanten Medientemperaturen eine Steigerung der erforderlichen Massenströme. Zur Realisierung der notwendigen Massenströme sind erhöhte Transportleistungen erforderlich. Die vorgegebenen Apparategeometrien bewirken eine Steigerung der Strömungsgeschwindigkeiten und eine Erhöhung des Druckverlustes. Der Einfluss der Mediengeschwindigkeit auf die erforderliche Antriebsleistung ist prinzipiell quadratisch. In der detaillierten Betrachtung sind sowohl die apparativen Strömungsbedingungen als auch die Kennlinien der Pumpen zu berücksichtigen. Die Steigerung der thermischen Übertragungsleistung kann nur im Rahmen der technischen Möglichkeiten der mit dem Apparat verbundenen Komponenten erfolgen. Die erforderlichen Mehraufwände, beispielsweise eine erhöhte elektrische Leistung, muss unter den realen Gegebenheiten berücksichtigt werden.

Für die Nutzung der Kapazität bestehender Wärmeübertragungsapparate wird empfohlen, die Eingangs- sowie die Ausgangstemperaturen der Medien zu messen. Entsprechen die Temperaturen am Ausgang und am Eingang dem angedachten Prozess, kann anschließend der Massenstrom der Medien gemessen werden. Entspricht dieser den Vorgaben, ist der Prozess bereits an seinen Kapazitätsgrenzen. Ist der reale Massenstrom kleiner als der im idealen Fall vorgegebene, sind die Übertragerflächen verschmutzt. Ist er jedoch größer als der ausgelegt, wird u.U. ein Teil der Kapazität der Überdimensionierung genutzt.

Ist die Ausgangstemperatur des zu kühlenden Mediums höher als für den Prozess erforderlich, ist der Apparat überlastet. Die Reduktion des Massenstroms ist soweit erforderlich, bis die Ausgangstemperatur den Grenzen des Prozesses entspricht.

Sollte die reale Temperatur des zu kühlenden Mediums kleiner sein als in der Auslegung festgelegt, kann der Massenstrom der Medien erhöht werden. Die Berechnung des gewünschten Zustandes erlaubt es, die einzustellenden Massenströme zu ermitteln. Die Prüfung der Apparatetechnik auf deren Eignung für den geänderten Betriebszustand ist essentiell. Der neue Betriebszustand wird als idealer Referenzpunkt des Apparates festgelegt. Die Bewertung der Effizienz kann dann im Bezug auf den neu gewählten Zustand erfolgen.

Diese Bewertung der Prozesskapazität beruht vor allem auf den Transport- bzw. Übertragungsvorgängen. Sie ist auf andere Prozesse und Verfahren übertragbar. Eine derartige Analyse setzt dazu die messtechnische Erfassung der Transport- und Zustandsgrößen zur Bestimmung des Leistungsvermögens voraus.

7 Schlussbetrachtungen

7.1 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass die dargestellte Erweiterung Voltas methodischen Vorgehens hin zu der **Methode der grenzwertorientierten Bewertung** auf Basis physikalisch und technisch begründeter Grenzwerte eine ganzheitliche Analyse und Bewertung von Prozessen sowie von Gesamtbetriebsweisen möglich ist. Jeder Prozess unterliegt idealen Grenzen. Dementsprechend besitzt auch jeder Prozess das Potential, physikalisch optimal abzulaufen. Dazu wurde sich der Komplexität der Verbesserung der Energie- bzw. Ressourceneffizienz systematisch und methodisch genähert. Der ideale Referenzprozess bildet die Basis für die Analyse. Dazu setzt die Anwendung ein System- und Prozessmodell sowie messtechnisch erfasste Kenntnisse des realen Prozesses voraus. Die dargelegte Systematik ermöglicht es eine ganzheitliche und übergreifende Analyse sowie Bewertung sowohl bestehender als auch geplanter Prozesse und Systeme durchzuführen. Das dargestellte methodische Vorgehen bildet die Grundlage für eine ganzheitliche Auswertung der Gesamtbetriebsweise mittels individueller Kennzahlen. Im Wesentlichen lassen sich die Erweiterungen mit Hilfe der folgenden vier Kernaspekte beschreiben.

Die am Verbrauch orientierte Methodik Voltas wurde um die perspektivische Betrachtung von Prozessen erweitert, um eine gesamtbetriebliche Bewertung z.B. eines Produktionsstandortes zu ermöglichen. Es wurde die Verbrauchs- als auch die Bedarfsperspektive eingeführt. Diese erlauben es, die Steigerung der Effizienz im Rahmen der Betrachtung der Gesamtbetriebsweise nachvollziehbar zu gestalten und bilanziell zu erfassen. Die vorgestellte Methode zeigt die gesamtbetriebliche Differenz zwischen dem Grenzwert und der Realität auf.

Im Vergleich zu der mengenbezogenen und rückwirkend bewertenden Methodik Voltas, kann mit Hilfe der eingeführten leistungsbezogenen Analyse die momentane Effizienz des Prozesses bewertet und zusätzlich Maßnahmen zur verbesserten Prozessführung abgeleitet werden. Eine leistungsbezogene Betrachtung bietet daher erhebliche Vorteile für die Verbesserung der Prozesse. Die Bewertung der Wirksamkeit von Verbesserungsmaßnahmen muss wiederum mittels einer mengenbezogenen Betrachtung erfolgen.

Darüber hinaus wurde dargestellt, dass bzgl. der Auswertung unter Verwendung von Kennzahlen Voltas technischer Ansatz mit Hilfe der Kenntnis über Grenzen des Prozesses um individuelle Kennzahlen erweitert werden kann. Solche KPI's beziehen sich auf den technisch begründeten Grenzfall, können aber zur ganzheitlichen Bewertung u.a. ökonomischer oder ökologischer Interessen verwendet werden. Von Vorteil ist, dass technische Verbesserungsmaßnahmen unter Berücksichtigung eines einheitlichen Bezugspunktes transparent in den äquivalenten Kennzahlen erkennbar sind.

Neben der bilanziellen Prozessbewertung wurde abschließend die ideale Grenze von Übertragungsprozessen betrachtet. Mittels der Methode kann die ideale Kapazität bestehender Apparate und Anlagen analysiert und bewertet werden, um deren Potential in die Steigerung der Effektivität zu integrieren.

7.2 Ausblick

Die Vielzahl möglicher Maßnahmen zur energetischen Verbesserung von Prozessen und Systemen lässt ein hohes Gesamtpotential vermuten. Allerdings kann das Potential nicht beziffert werden, da die Grenzen bisher nicht bekannt sind. Gleiches gilt für die stoffliche Effizienz von Prozessen sowie für den Zusammenhang zwischen der stofflichen und der energetischen Verbesserung. Auf Basis der vorgestellten Methode kann dieser Zusammenhang für eine Vielzahl konventioneller Prozesse und klassischer Verbesserungsstrategien analysiert und in Form von standardisierten Vergleichsprozessen und Vergleichssystemen bewertet werden.

Die ökonomische und ökologische Wirkung der technischen grenzwertorientierten Verbesserungen im Zusammenhang ist mit den realen betriebswirtschaftlichen Einflüssen zu analysieren und zu bewerten. Das Ziel der Analyse sollte die Betrachtung des betriebswirtschaftlichen Optimums im Vergleich zu dem physikalischen Optimum sein.

Die leistungsbezogene Bewertung im Bezug auf den idealen Prozess sollte als Regel- und Steuerungsgröße in den Betrieb von Prozessen integriert werden. Dazu ist die mengenbezogene Wirkung der veränderten Steuerung unter Berücksichtigung des realen Nutzerverhaltens zu analysieren und geeignete Prozesse zu identifizieren.

Anhang

Anhang 1: Lebenslauf

Persönliche Angaben:

Carsten Keichel
Geboren am 30. Juli 1984 in Magdeburg
ledig



Berufserfahrung:

- seit 09/2013 Leiter der Geschäftsstelle des Fraunhofer-Innovationsclusters ER-WIN® »Intelligente, energie- und ressourceneffiziente regionale Wertschöpfungsketten in der Industrie«
- seit 11/2010 Projektleiter am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF im Bereich Prozess- und Anlagentechnik
- 11/2009 - 06/2010 Werksstudent bei der Konzernforschung für Antriebstechnologie der Volkswagen AG im Bereich der Brennstoffzellen im Technologiezentrum Elektrotraktion Isenbüttel
- 04/2005 - 09/2005 Assistent der Baustellenleitung der Firma Linde-KCA-Dresden GmbH bei der Errichtung und Inbetriebnahme der „Mechanisch biologischen Abfallaufbereitungsanlage“ Cröbern - Leipzig
- 07/2003 - 08/2003 Assistent der Baustellenleitung der Firma Linde-KCA-Dresden GmbH bei der Inbetriebnahme der Nassmüllvergärungsanlage Pinto - Madrid

Studium:

- 10/2005 - 08/2010 Studium der Verfahrenstechnik Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg - Abschluss: Diplomingenieur
- 02/2010 - 08/2010 Diplomarbeit im Technologiezentrum Elektrotraktion Isenbüttel der Volkswagen AG: „Untersuchungen des Einflusses gasförmiger Luftschadstoffe auf die Standzeiten von PEM-Brennstoffzellen in Abhängigkeit von Betriebsparametern und Filterbetrieb“
- 04/2009 - 09/2009 Studienarbeit am Institut für Apparate- und Umwelttechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg: „Experimentelle Untersuchungen und theoretische Überlegungen zur Agglomeration von Monocalciumphosphat in der Wirbelschicht“

Anhang 2: Publikationsliste**Bücher / Sammelbandbeiträge:**

Keichel, C.; Heidecke, P.; Gohla, M.: Thermische Nutzung kommunaler biogener Reststoffe - Potenziale, Methoden, In: Wagner, H.-J.; Görres, J. (Hrsg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt": Energieversorgung, Energiebilanzierung und Monitoring. Reihe: Energie und Nachhaltigkeit, Band 15: Seiten 115-124, Stuttgart, LIT Verlag, 2014 - ISBN: 978-3-643-12711-2

Keichel, C.; Heidecke, P.; Gohla, M.: Thermische Nutzung kommunaler biogener Reststoffe - Potenziale, Methoden, Technologien. Wagner, Görres (Hrsg.) 2014 – Wettbewerb Energieeffiziente Stadt ISBN 978 3 643 12711 2

Keichel, C.; Gohla, M.; Weigel, K.: Prozessoptimierung für energie- und ressourceneffiziente Wertschöpfungsketten durch ganzheitliche Betrachtung productivITy 5 / 2015

Keichel, C.: Optimierung ist endlich - Neue Methodik zur systematischen Bewertung und Verbesserung der Energieeffizienz von Produktionsanlagen und -prozessen (2015) In: Biedermann H.; Vorbach S.; Posch W. (Hrsg.): Innovation und Nachhaltigkeit: Strategisch-operatives Energie- und Ressourcenmanagement Rainer Hampp Verlag München, Mering, 2015 - ISBN 978-3-95710-033-7

Schenk, M.; Seidel, H.; Kujath, M.; Keichel, C.: »Mit ER-WIN® zur volatilen Produktion«, Jubiläumsausgabe Jahrbuch Logistik 2016 In: Wolf-Kluthausen, H.; (Hrsg.): Jahrbuch Logistik 2016, Seiten 56-60, Korschbroich, free beratung GmbH

Tagungsbandbeiträge:

Keichel, C.; Heidecke, P.; Gohla, M.: Nutzung regional anfallender Biomasse zur Wärme- und Stromversorgung im innerstädtischen Bereich. In: Tagungsband 8. Rostocker Bioenergieforum. Rostock, 2014

Keichel, C.: Nutzung regional anfallender Biomasse zur Wärme- und Stromversorgung im innerstädtischen Bereich. In: 4. Mitteleuropäische Biomassekonferenz. Graz, 15.01.-18.01.2014. Österreichischer Biomasse-Verband (Wien). Wien/Austria, S. 148.

Keichel, C.: Optimierung ist endlich - Neue Methodik zur systematischen Bewertung und Verbesserung der Energieeffizienz von Produktionsanlagen und -prozessen (2015) 6. SMI-Kongress "Innovation & Nachhaltigkeit"

Keichel, C.; Sankol, B.: Mit Kennzahlen die Energieeffizienz von Prozessen bewerten. In: Tagungsband Tagung – Anlagenbau der Zukunft „Anlagenbau 4.0 – Stand und Perspektiven für Betreiber, Planer und Kontraktoren“, Magdeburg, ISSN 2192-1776

Keichel, C.; Sankol, B.: Mit Kennzahlen die Energieeffizienz von Prozessen bewerten. Chemie Ingenieur Technik, 88: S.1306. (2016) doi:10.1002/cite.201650077

Keichel, C.: Bewertung von Gesamtbetriebsweisen - Die Anwendung von Speichern setzen eine grenzwertorientierte Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz voraus. In: Tagungsband Forum Umwelt- und Energietechnik 2016 – Speichertechnologien, Clausthal-Zellerfeld, ISBN 978-3-86948-535-5

Vorträge:

Keichel, C.: Senkung des Wärmebedarfs durch Prozessoptimierung am Beispiel einer Holzveredelungsanlage, Tagung: 3. Energiestammtisch Nördliches Sachsen-Anhalt. Magdeburg, 04.07.2013.

Keichel, C.: Ressourceneffizient durch Wachs-Recycling in der Holzveredelung (2013) 15. IFF-Forschungskolloquium

Keichel, C.: Energieeffizienz in der Produktion am Beispiel der Abwärmenutzung - Lösungsansätze im Überblick (2013) IHK Magdeburg Veranstaltungsreihe "Energiesparen praktisch"

Keichel, C.: Nutzung regional anfallender Biomasse zur Wärme- und Stromversorgung im innerstädtischen Bereich. Das „KWK-Modelvorhaben“ eine Maßnahme des BMBFs Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt, Tagung: 4. Mitteleuropäische Biomassekonferenz, Graz, 15.01.2014.

Keichel, C.: Energieeffiziente Produktion. Energie ganzheitlich betrachten, Tagung: Wissenschaftstage des IFF. Fraunhofer IFF, Magdeburg. Fraunhofer IFF, Magdeburg. Magdeburg, 26.06.2014.

Keichel, C.: Das physikalische Optimum. Neue Methodik zur systematischen Bewertung und Verbesserung der Energieeffizienz von Produktionsanlagen und -prozessen, Tagung: VDI Fachausschusssitzung des Fachausschusses für Energieanwendung. Dresden, 09.10.2014.

Keichel, C.: Simulationen zur effizienten Wärmenutzung. Abwärmenutzung aus industriellen Produktionsprozessen, Workshop: 5. Workshop »Energieeffiziente Produktion«. Fraunhofer IFF, Magdeburg. Fraunhofer IFF, Magdeburg. Magdeburg, 22.01.2015.

Keichel, C.: Das Physikalische Optimum. Neue Methodik zur systematischen Bewertung und Verbesserung der Energieeffizienz von Produktionsanlagen und -prozessen, Tagung: VDI-Fachgesellschaft Energie und Umwelt (VDI-GEU). Karlsruhe, 20.03.2015.

Keichel, C.: Optimierung ist endlich - Neue Methodik zur systematischen Bewertung und Verbesserung der Energieeffizienz von Produktionsanlagen und -prozessen (2015) 6. SMI-Kongress "Innovation & Nachhaltigkeit"

Keichel, C.: Optimierung ist endlich. Neue Methodik zur systematischen Bewertung und Verbesserung der Energieeffizienz von Produktionsanlagen und -prozessen, Workshop: 7. Workshop Energieeffiziente Produktion. Fraunhofer IFF, Magdeburg. Magdeburg, 01.04.2015.

Betty, A.; Keichel, C.: Energy supply from agricultural waste by means of fluidized bed combustion and gasification, 20 th International Conference for Renewable Resources and Plant Biotechnology. NAROSSA®. Magdeburg, 13.06.2016.

Keichel, C.: Fraunhofer ER-WIN® Innovation Cluster - Strengthening Regional Industry Value Chains, Fachkonferenz: Forum Energieeffizienz. Auslandshandelskammer (AHK) Argentinien. Buenos Aires Argentinien. 28.06.2016.

Keichel, C.: Mit Kennzahlen die Energieeffizienz von Prozessen bewerten, 9. Fachtagung „Anlagenbau der Zukunft“ Anlagenbau 4.0 – Stand und Perspektiven für Betreiber, Planer und Kontraktoren. Fraunhofer IFF, Magdeburg. Magdeburg, 23.06.2016.

Keichel, C.: Mit Kennzahlen die Energieeffizienz von Prozessen bewerten, ProcessNet-Jahrestagung und 32. DECHEMA-Jahrestagung der Biotechnologen 2016, Aachen, 13.09.2016

Keichel, C.: Bewertung von Gesamtbetriebsweisen - Die Anwendung von Speichern setzen eine grenzwertorientierte Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz voraus, Forum Umwelt- und Energietechnik 2016. Technische Universität Clausthal. Clausthal-Zellerfeld, 21.10.2016

Poster:

Keichel, C.; Birth, T.: efficient recovery of energy from renewable solid fuels, Poster. 23. EUBCE in Hamburg. Hamburg, 23.06.2014.

Betreute studentische Abschlussarbeiten :

Nicole Meyer - „Potentialanalyse zur Abwärmerückgewinnung aus Produktionsanlagen eines Automobilzulieferers unter Anwendung eines entwickelten Handlungsleitfadens“

Vera Fehrenbacher, Andre Marcel Carevic & Paul Timm - „Physikalisches Optimum Anwendung der Methodik des physikalischen Optimums zur Bewertung eines Kühlwasserkreislaufs einer Schwefelsäureproduktion“

Jonne Bobis, Simon Hellwege, Nicolai Jensen & Marcus Seidel - „Ermittlung und Vergleich des Physikalischen Optimums von ORC-Prozess, Blockheizkraftwerk und Dampfturbine“

Marco Wieland, Marc Lingenhoff, Andre Marcel Carevic & Berca Tuna – „Anwendung der Methode des Physikalischen Optimums - Vergleich zwischen Fernwärme und dezentraler Warmwasserversorgung“

Mathies Konstantin – „Wirtschaftliche Bewertung der Methode des physikalischen Optimums am Beispiel eines Rohrbündelwärmeübertragungsapparates“

Jöran Blendermann, Christian Derber, Felix Samsel & Kenneth Teetzen – „Das Physikalische Optimum am Beispiel eines 2 Zylinder 4 Takt Dieselmotors“

Alexander Meidert, Eike Labach, Henning Kienemann & Timo Konczalla – „Das Physikalische Optimum einer Windenergieanlage“

Nicole Beckmann, Bastian Belusic, Carsten Kühne & Tim Köster - „Physikalisches Optimum (PhO) - PV- und Windenergieanlagen“

Merten Neeser – „Analyse von strömungstechnischen und thermodynamischen Einflüssen auf eine Pulverflamme“

Stefan Meyer – „Experimentelle Untersuchung des Transport- und Lagerverhaltens eines Pulvers aus der Metallbeschichtung“

Sebastian Lenz - "Entwicklung eines vergleichenden Algorithmus für Methoden zur Bewertung der Energieeffizienz"

Agnieszka Mackowiack - "Energieeffizienz in der Papierindustrie – Anwendung von open source Simulationstools"

Stephan Lohfeld - Auswirkungen der Prozessführung auf den Betrieb eines Strahlbrenners zur Verbrennung feinkörniger Reststoffe

Andre Marcel Carevic - Entwicklung und Validierung eines Kennzahlensystems zur Bewertung und Optimierung der Energieeffizienz von Karosseriebauprozessen und –anlagen

Bastian Belusic - Entwicklung & Validierung von Bewertungsmethoden & Optimierungsansätzen zur Effizienz- & Flexibilitätssteigerung raumluftechnischer Anlagen

Anhang 3: Beispiel Warmwasserzapfung

Dieser Anhang enthält Daten für das Beispiel der bilanziellen Prozessbewertung aus der Bedarfsperspektive.

Tabelle 6: Mittleres Zapfmuster für eine Familie mit Duschnutzung. Nach DIN EN 13203-2 (Lastprofil M) bzw. nach DIN EN 15316-3-1 (Zapfprogramm 2) sowie die ideale Wärmeleistung und Wärmemenge

Nr.	Zapfung			Warmwasser			Wärme		
	Start-Uhrzeit [hh:min]	Art	Dauer [min]	Durchfluss [l/min]	Zapfmenge [l]	Summe [l]	Leistung [kW]	Menge [kWh]	summierte Menge [kWh]
1	07:00	Klein	0,66	3		0	5,429	0,000	0,000
	07:01			3	1,98	1,98	5,429	0,060	0,060
2	07:05	Duschen	4,5	10		1,98	18,096	0,000	0,060
	07:09			10	45	46,98	18,096	1,357	1,417
3	07:30	Klein	0,66	3		46,98	5,429	0,000	1,417
	07:30			3	1,98	48,96	5,429	0,060	1,477
4	08:01	Klein	0,66	3		48,96	5,429	0,000	1,477
	08:01			3	1,98	50,94	5,429	0,060	1,536
5	08:15	Klein	0,66	3		50,94	5,429	0,000	1,536
	08:15			3	1,98	52,92	5,429	0,060	1,596
6	08:30	Klein	0,66	3		52,92	5,429	0,000	1,596
	08:30			3	1,98	54,9	5,429	0,060	1,656
7	08:45	Klein	0,66	3		54,9	5,429	0,000	1,656
	08:45			3	1,98	56,88	5,429	0,060	1,716
8	09:00	Klein	0,66	3		56,88	5,429	0,000	1,716
	09:00			3	1,98	58,86	5,429	0,060	1,775
9	09:30	Klein	0,66	3		58,86	5,429	0,000	1,775
	09:30			3	1,98	60,84	5,429	0,060	1,835
10	10:30	Bodenreinigung	0,66	3		60,84	5,429	0,000	1,835
	10:30			3	1,98	62,82	5,429	0,060	1,895
11	11:30	Klein	0,66	3		62,82	5,429	0,000	1,895
	11:30			3	1,98	64,8	5,429	0,060	1,954
12	11:45	Klein	0,66	3		64,8	5,429	0,000	1,954
	11:45			3	1,98	66,78	5,429	0,060	2,014
13	12:45	Geschirrspülen 1	1,5	4		66,78	7,238	0,000	2,014
	12:46			4	6	72,78	7,238	0,181	2,195
14	14:30	Klein	0,66	3		72,78	5,429	0,000	2,195
	14:30			3	1,98	74,76	5,429	0,060	2,255
15	15:30	Klein	0,66	3		74,76	5,429	0,000	2,255
	15:30			3	1,98	76,74	5,429	0,060	2,314
16	16:30	Klein	0,66	3		76,74	5,429	0,000	2,314
	16:30			3	1,98	78,72	5,429	0,060	2,374
17	18:00	Klein	0,66	3		78,72	5,429	0,000	2,374
	18:00			3	1,98	80,7	5,429	0,060	2,434
18	18:15	Haushaltsreinigung	0,66	3		80,7	5,429	0,000	2,434
	18:15			3	1,98	82,68	5,429	0,060	2,494
19	18:30	Haushaltsreinigung	0,66	3		82,68	5,429	0,000	2,494
	18:30			3	1,98	84,66	5,429	0,060	2,553
20	19:00	Klein	0,66	3		84,66	5,429	0,000	2,553
	19:00			3	1,98	86,64	5,429	0,060	2,613
21	20:30	Geschirrspülen 3	3,5	4		86,64	7,238	0,000	2,613
	20:33			4	14	100,64	7,238	0,422	3,035
22	21:15	Klein	0,66	3		100,64	5,429	0,000	3,035
	21:15			3	1,98	102,62	5,429	0,060	3,095
23	21:30	Duschen	4,5	10		102,62	18,096	0,000	3,095
	21:34			10	45	147,62	18,096	1,357	4,452
				jährliche Menge		53881,30	jährliche Menge		53881,300

Literaturverzeichnis

Primärliteratur:

- 1 Blesl 2013 Blesl, M./ Kessler, A.: Energieeffizienz in der Industrie. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg, 2013.
- 2 BMWi 2016 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Grünbuch Energieeffizienz - Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Berlin, 2016.
- 3 DIN 13203-2 2015 DIN EN 13203-2:2015-08, Gasbeheizte Geräte für die sanitäre Warmwasserbereitung für den Hausgebrauch - Teil 2: Bewertung des Energieverbrauchs; Deutsche Fassung EN 13203-2:2015.
- 4 DIN 14040 2009 DIN EN ISO 14040:2009-11, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006, 2009.
- 5 DIN 15316-3-1 2008 DIN EN 15316-3-1:2008-06, Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen - Teil 3-1: Trinkwassererwärmung, Charakterisierung des Bedarfs (Zapfprogramm); Deutsche Fassung EN 15316-3-1:2007.
- 6 DIN 16212 2012 DIN EN 16212:2012-11, Energieeffizienz- und -einsparberechnung – Top-Down- und Bottom-Up-Methoden; Deutsche Fassung EN 16212, 2012.
- 7 DIN 16247-1 2012 DIN EN 16247-1:2012-10, Energieaudits –Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 16247-1, 2012.

-
- | | | |
|----|-----------------------|---|
| 8 | DIN 50001 2011 | DIN EN ISO 50001:2011-12, Energiemanagementsysteme Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 50001:2011); Deutsche Fassung EN ISO 50001, 2011. |
| 9 | DIN 9001 2009 | DIN EN ISO 9001:2015-11, Qualitätsmanagementsysteme –Anforderungen (ISO 9001:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9001:2015. |
| 10 | DIN V 18599-1 2011 | DIN V 18599-1: 2011-12, Energetische Bewertung von Gebäuden - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger. |
| 11 | Girbig 2014 | Brief von Dr. Paul Girbig an Frau Dr. Eleni Konstantinido (VDI Fachbereich Ressourcenmanagement, VDI Fachbereich Energiewandlung und -anwendung), Erlangen, 12,11,2014 |
| 12 | Grabowski et al. 2015 | Grabowski, K./ Kubin, K./ Ernst, C./ Diehl, S./ Melsheimer, J.: Entwicklung einer Methodik zur Aufstellung von Energiekennzahlen zur Steigerung der Energieeffizienz in Unternehmen. Berlin, 2015 |
| 13 | Grote et al. 2011 | Grote, K.-H./ Feldhusen, J.: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. |
| 14 | Martin et al. 2005 | Martin, H: VDI-Wärmeatlas. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. |
| 15 | Müller et al. 2009 | Müller, E./ Engelmann, J./ Löffler, T./ Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. |
| 16 | Paukzstat 2006 | Paukzstat, A.: Anlagenspezifische Referenzformeln als Basis für die Allokation von CO ₂ -Emissionsberechtigungen. Dissertation, Rüsselsheim, 2006. |

-
- 17 Schmid 2004 Schmid, C.: Energieeffizienz in Unternehmen - Eine wissensbasierte Analyse von Einflussfaktoren und Instrumenten. Zürich: vdf, 2004.
- 18 Schneider 2016 Schneider, J./ Krey, T. / Zöldner, T.: Projektarbeit - Energieeffiziente Anlagensysteme - Thema: Der Einfluss von Sicherheiten auf den idealen Wärmeübertrager, Hamburg 2016
- 19 Schütt et al. 1990 Schütt, E./ Nietsch, T./ Rogowski, A.: Prozeßmodelle - Bilanzgleichungen in der Verfahrenstechnik und Energietechnik. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1990.
- 20 VDI 2221 1993 Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth, 1993.
- 21 VDI 4600 2012 Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 4600 - Kumulierter Energieaufwand (KEA) Begriffe, Berechnungsmethoden. Berlin: Beuth, 2012.
- 22 VDI 4661 2014 Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 4661 - Energiekenngrößen - Grundlagen – Methodik. Berlin: Beuth, 2014.
- 23 VDI 4662 2015 Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 4662 - Bildung, Implementierung und Nutzung von Energiekennwerten. Berlin: Beuth, 2015.
- 24 VDI 4800 2014 Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 4800 - Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Berlin: Beuth, 2014.
- 25 Volta 2014 Volta, D.: Das Physikalische Optimum als Basis von Systematiken zur Steigerung der Energie- und Stoffeffizienz von Produktionsprozessen. Dissertation, Clausthal-Zellerfeld, 2014.

Sekundärliteratur:

- 26 Blass 1981 Blass, E.: Verfahren mit Systemtechnik entwickelt. VDI-Nachrichten Nr. 29 1981, 1981
- 27 Franke 1975 Franke, H.-J.: Methodische Schritte beim Klären konstruktiver Aufgabenstellungen. Konstruktion 27 (1975) S. 395/402, 1975.
- 28 Hesselbach 2012 Hesselbach, J.: Energie- und klimaeffiziente Produktion: Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- 29 Lindemann 1980 Lindemann, U.: Systemtechnische Betrachtung des Konstruktionsprozesses unter besonderer Berücksichtigung der Herstellkostenbeeinflussung beim Festlegen der Gestalt. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1980.
- 30 Rouvel 2003 Rouvel, L. / Deutscher, P.: Energetische Bewertung haustechnischer Anlagen – Der „normierte Energieaufwand“. HLH-Springer Verlag, Bd 54, Juli 2003.
- 30 Schenk et al. 2004 Schenk M./ Wirth S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb – Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Berlin: Springer, 2004.
- 31 Schmigalla 1995 Schmigalla, H.: Fabrikplanung – Begriffe und Zusammenhänge. München: Carl Hanser Verlag, 1995.
- 32 Wirth 1989 Wirth S. (Hrsg): Flexible Fertigungssysteme. Berlin: Verlag Technik, 1989.