

**EXERGETISCHE UND EXERGOÖKONOMISCHE BEWERTUNG
VON VERFAHREN DER ENERGIE- UND STOFFWANDLUNG**

von

Karsten Riedl aus Halle (Saale)

dem

Zentrum für Ingenieurwissenschaften
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegte Dissertation

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. D. Hebecker

Prof. Dr.-Ing. G. Tsatsaronis

Datum der Verteidigung: 21.05.2007

Merseburg, 20.12.2006

urn:nbn:de:gbv:3-000012323

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000012323>]

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meines Promotionsstudiums am Institut für Umwelttechnik des Fachbereichs Ingenieurwissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen und Institutionen bedanken, die mich bei diesem Vorhaben unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietrich Hebecker für die Möglichkeit zur Promotion, für die ständige Gesprächsbereitschaft und für die exzellente wissenschaftliche Betreuung.

Allen Mitarbeitern der Abteilung Energietechnik gilt mein Dank für die vielfältige Unterstützung, die kollegiale Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima am Institut. Besonders bedanken möchte ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Petra Bittrich für ihren fachlichen Rat und bei Frau Ute Mentzel für die Hilfe bei der Erstellung der Grafiken. Die Studierenden Thomas Kröner und Florian Kunde trugen mit ihren Projektarbeiten ebenfalls zum Gelingen der Arbeit bei.

Der Graduiertenförderung des Landes Sachsen-Anhalt und dem Institut für Umweltschutz und Entsorgungstechnik Merseburg e.V. danke ich für die finanzielle Unterstützung meiner Arbeit.

Ohne ein entsprechendes soziales Umfeld wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass sie meinen bisherigen Bildungsweg ermöglicht haben und mich stets in jeglicher Hinsicht unterstützten. Ich danke meinem Freundeskreis für die gemeinsame Zeit in Halle. Ein besonders großes Dankeschön geht an Susanne Kranepuhl für die schöne Zeit in der Wohngemeinschaft und das gewissenhafte Korrekturlesen. Ein großes „Spasibo“ auch an meine russischen Freunde und an alle Mitstreiter der „Freunde Baschkortostans e.V.“.

Karsten Riedl

INHALTSVERZEICHNIS

1	Problemstellung.....	1
1.1	Thermodynamik und Ökonomie.....	2
1.1.1	Natur und Wirtschaft.....	2
1.1.2	Einfluss des Entropiegesetzes.....	3
1.1.3	Kuppelproduktion.....	4
1.1.4	Umweltprobleme und Sustainability.....	5
1.2	Ökonomische Modellvorstellungen.....	6
1.2.1	Neoklassisches Wirtschaftsmodell.....	6
1.2.2	Ökonomisch-ökologisches Modell.....	8
1.2.3	Exergetisches Wirtschaftsmodell.....	9
1.3	Modellierung von Systemen.....	11
1.3.1	Bilanzierung.....	12
1.3.2	Hierarchisch strukturierte Systeme.....	13
1.4	Bewertungserfordernisse und -ziele.....	14
1.5	Aufbau der Arbeit.....	16
2	Exergetische Bewertung.....	18
2.1	Exergie als thermodynamische Bewertungsgröße.....	18
2.1.1	Definition.....	19
2.1.2	Umgebungszustand.....	21
2.1.3	Berechnungsgleichungen.....	23
2.1.4	Exergieanteile.....	24
2.2	Exergiebilanz.....	26
2.2.1	Reversibilität und Irreversibilität.....	26
2.2.2	Input-Output-Bilanz.....	27
2.2.3	Aufwand-Nutzen-Bilanz.....	27
2.3	Transitbereinigung.....	29
2.3.1	Definition und Bedeutung.....	29
2.3.2	Möglichkeiten der Transitbereinigung.....	30
2.3.2.1	Anteilsorientierter Transit.....	31
2.3.2.2	Wandlungsorientierter Transit.....	32
2.3.2.3	Potentialorientierter Transit.....	33
2.3.3	Definition des Feedfaktors.....	36
2.4	Exergetische Kennzahlen.....	37
2.5	Exergetische Bewertung strukturierter Systeme.....	39
2.5.1	Besonderheiten der Bewertung.....	39
2.5.2	Behandlung äußerer Exergieverluste.....	40
2.5.2.1	Direkter äußerer Exergieverlust.....	41
2.5.2.2	Indirekter äußerer Exergieverlust.....	41
2.5.2.3	Systembedingter äußerer Exergieverlust.....	43
2.5.3	Exergieformen.....	43
2.5.3.1	Basisexergie.....	44
2.5.3.2	Akkumulierte Exergieverluste.....	46
2.5.3.3	Totalexergie.....	47
2.5.4	Definition systembezogener Kennzahlen.....	47
2.5.5	Bewertung mit dem Basisexergiefaktor.....	50

2.5.6	Ableitung von Verbesserungspotentialen	51
2.5.7	Vergleich mit alternativen Bewertungsmethoden.....	52
2.5.7.1	Systembewertung mit Matrizen.....	52
2.5.7.2	Lebenszyklusanalysen.....	54
3	Exergoökonomische Bewertung.....	56
3.1	Kosten als ökonomische Bewertungsgröße.....	56
3.1.1	Definition.....	57
3.1.2	Kostenrechnungssysteme.....	58
3.1.3	Kostenarten in der exergoökonomischen Betrachtungsweise	60
3.1.3.1	Exergiekosten.....	61
3.1.3.2	Investitionskosten	61
3.1.3.3	Personal- und Instandhaltungskosten	63
3.2	Exergoökonomisches Kostenmodell.....	63
3.2.1	Grundlegende Annahmen.....	64
3.2.2	Kostenbilanz.....	65
3.2.3	Kostentransit und Feedkostenfaktor	66
3.2.4	Basiskosten.....	68
3.2.5	Zusatzkosten.....	69
3.2.6	Kostenallokation bei Kuppelproduktion	70
3.3	Exergoökonomische Kennzahlen	74
3.3.1	Kostengrad.....	74
3.3.2	Zusatzkostengrad.....	74
3.3.3	Exergoökonomische Ähnlichkeitskennzahl	78
3.4	Exergoökonomische Bewertung strukturierter Systeme	80
3.4.1	Besonderheiten der Bewertung.....	80
3.4.2	Akkumulierte Zusatzkosten.....	80
3.4.3	Kostenallokation im hierarchischen System.....	83
3.4.4	Definition systembezogener Kennzahlen.....	84
3.4.5	Bewertung mit dem Basiskostenfaktor.....	86
3.4.6	Ableitung von Verbesserungspotentialen	87
3.4.7	Vergleich mit alternativen Bewertungsmethoden.....	88
4	Anwendungsbeispiele.....	93
4.1	Rechnerische Umsetzung.....	93
4.2	Vergasungsanlage für Abfallstoffe der Papierindustrie.....	100
4.2.1	Verfahrensbeschreibung.....	100
4.2.2	Ergebnisse der exergetischen Analyse	104
4.2.2.1	Gesamtsystemebene	104
4.2.2.2	Teilsystemebene	105
4.2.2.3	Transitbereinigung	106
4.2.2.4	Apparateebene	110
4.2.2.5	Exergieströme	115
4.2.3	Ergebnisse der exergoökonomischen Analyse.....	117
4.2.3.1	Gesamtsystemebene	118
4.2.3.2	Teilsystemebene	118
4.2.3.3	Transitbereinigung	119
4.2.3.4	Zusatzkostenverteilung	122
4.2.3.5	Apparateebene	125
4.2.3.6	Exergieströme	129
4.2.3.7	Einfluss des Exergiepreises	130
4.2.3.8	Verbesserungsmöglichkeiten	132

4.3	Verfahren zur Altreifenpyrolyse.....	133
4.3.1	Verfahrensbeschreibung.....	134
4.3.2	Ergebnisse der exergetischen Analyse	136
4.3.2.1	Gesamtverfahren.....	137
4.3.2.2	Teilsystemebene	137
4.3.2.3	Apparateebene	139
4.3.3	Ergebnisse der exergoökonomischen Analyse.....	144
4.3.3.1	Gesamtsystemebene.....	145
4.3.3.2	Teilsystemebene	146
4.3.3.3	Zusatzkostenverteilung	148
4.3.3.4	Apparateebene	150
4.3.3.5	Exergieströme	154
4.3.3.6	Kostenallokation	155
4.3.3.7	Einfluss des Exergiepreises	156
4.3.3.8	Verbesserungsmöglichkeiten	157
5	Zusammenfassung.....	159

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1: Neoklassisches Wirtschaftsmodell	7
Abbildung 1.2: Ökonomisch-ökologisches Modell	9
Abbildung 1.3: Exergetisches Wirtschaftsmodell.....	10
Abbildung 1.4: Modell eines Systems	11
Abbildung 1.5: Hierarchische Systemstruktur	14
Abbildung 1.6: Struktur der Arbeit	17
Abbildung 2.1: Exergiebilanz bei Input-Output-Betrachtung.....	27
Abbildung 2.2: Exergiebilanz bei Nutzendefinition	28
Abbildung 2.3: Exergiebilanz bei exergetischer Transitbereinigung.....	30
Abbildung 2.4: Bilanzraum um einen Wärmeübertrager	32
Abbildung 2.5: Temperaturverlauf bei der Gegenstrom-Wärmeübertragung.....	34
Abbildung 2.6: Exergiebilanz eines Systems mit Nutz- und Abfallexergieströmen	40
Abbildung 2.7: Schema des indirekten äußeren Exergieverlustes.....	42
Abbildung 2.8: Basisexergie und akkumulierte Exergieverluste	44
Abbildung 2.9: Exergiebilanz bei Berücksichtigung akkumulierter Exergieverluste	45
Abbildung 3.1: Exergoökonomisches Kostenmodell	64
Abbildung 3.2: Kostenbilanz bei Input-Output-Betrachtung	65
Abbildung 3.3: Kostenbilanz bei exergetischer Transitbereinigung	67
Abbildung 3.4: Transitbereinigte Kostenbilanz um einen Wärmeübertrager	72
Abbildung 3.5: Dreieckdiagramm der Zusatzkostengradanteile	76
Abbildung 3.6: Pyramide der Zusatzkostengradanteile.....	76
Abbildung 3.7: Kostensektoren.....	77
Abbildung 3.8: ε -Pa*-Diagramm	79
Abbildung 3.9: Kostenbilanz mit akkumulierten Kosten	81
Abbildung 3.10: Exergoökonomie in strukturierten Systemen	83
Abbildung 3.11: Schema der Flusskostenrechnung.....	91
Abbildung 4.1: Aufbau der Rechnung	94
Abbildung 4.2: Schema der Vergasungsanlage	101
Abbildung 4.3: Verlustbeiträge zum Verlustgrad des Gesamtsystems.....	105
Abbildung 4.4: Exergetische Kennzahlen der Teilsysteme	106
Abbildung 4.5: Verlustgrad in Abhängigkeit von der Transitbereinigung.....	107
Abbildung 4.6: Wichtungsfaktor in Abhängigkeit von der Transitbereinigung	108
Abbildung 4.7: Verlustbeitrag in Abhängigkeit von der Transitbereinigung	109
Abbildung 4.8: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Aufbereitung“	110
Abbildung 4.9: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Trocknung“	111
Abbildung 4.10: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Vergasung“	113
Abbildung 4.11: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Gasreinigung“	113
Abbildung 4.12: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Nutzung“	114
Abbildung 4.13: Basisexergiefaktoren der Ströme	115
Abbildung 4.14: Exergetisches Flussbild auf Teilsystemebene	117
Abbildung 4.15: Zusatzkostenbeiträge zum Zusatzkostengrad des Gesamtsystems	119
Abbildung 4.16: Zusatzkostengrad in Abhängigkeit von der Transitbereinigung	120
Abbildung 4.17: Exergoökon. Wichtungsfaktor in Abhängigkeit von der Transitbereinigung.....	121
Abbildung 4.18: Zusatzkostenbeitrag in Abhängigkeit von der Transitbereinigung.....	122
Abbildung 4.19: Dreieckdiagramm der Zusatzkostenanteile	123
Abbildung 4.20: Verteilung in den Kostensektoren	124

Abbildung 4.21: Anteile an den Zusatzkostenbeiträgen der Teilsysteme.....	124
Abbildung 4.22: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Aufbereitung“	125
Abbildung 4.23: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Trocknung“	126
Abbildung 4.24: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Vergasung“	127
Abbildung 4.25: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Gasreinigung“	128
Abbildung 4.26: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Nutzung“	129
Abbildung 4.27: Basiskostenfaktoren der Ströme.....	130
Abbildung 4.28: Zusatzkostenanteile bei einem Abfallstoffpreis von 0,00 EUR/kWh	131
Abbildung 4.29: Zusatzkostenanteile bei einem Abfallstoffpreis von 0,02 EUR/kWh	131
Abbildung 4.30: Schema der Pyrolyseanlage.....	135
Abbildung 4.31: Verlustbeiträge zum Verlustgrad des Gesamtsystems	137
Abbildung 4.32: Exergetische Kennzahlen der Teilsysteme.....	138
Abbildung 4.33: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Aufbereitung“	139
Abbildung 4.34: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Thermische Strecke“	140
Abbildung 4.35: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Rohgasbehandlung“	141
Abbildung 4.36: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Energieerzeugung“	143
Abbildung 4.37: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Feststoffstrecke“	144
Abbildung 4.38: e-Pa*-Diagramm des Gesamtsystems	146
Abbildung 4.39: Zusatzkostenbeiträge zum Zusatzkostengrad des Gesamtsystems	147
Abbildung 4.40: Exergoökonomische Kennzahlen der Teilsysteme	148
Abbildung 4.41: Verteilung in den Kostensektoren	148
Abbildung 4.42: Anteile an den Zusatzkostenbeiträgen der Teilsysteme.....	149
Abbildung 4.43: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Aufbereitung“	150
Abbildung 4.44: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Thermische Strecke“	151
Abbildung 4.45: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Rohgasbehandlung“	152
Abbildung 4.46: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Energieerzeugung“	152
Abbildung 4.47: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Feststoffstrecke“	153
Abbildung 4.48: Basiskostenfaktoren der Ströme.....	154
Abbildung 4.49: Zusatzkostenanteile bei einem Abfallstoffpreis von 0,02 EUR/kWh	157

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1: Vergleich Energie-Exergie.....	21
Tabelle 2.2: Zusammensetzung der Umgebungsluft.....	22
Tabelle 2.3: Exergetische Bewertungskennzahlen	50
Tabelle 3.1: Übersicht Kostenrechnungssysteme.....	59
Tabelle 3.2: Exergoökonomische Bewertungskennzahlen.....	86
Tabelle 4.1: Eckdaten der Vergasungsanlage	101
Tabelle 4.2: Eckdaten der Pyrolyseanlage.....	134
Tabelle 4.3: Hierarchieebene und Kostenallokation.....	155

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

(A) Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Anergiestrom	kW
a	Produktionskoeffizient	
c	spezifische Wärmekapazität	kJ/kgK
E	Exergiestrom	kW
e	spezifische Exergie	kJ/kg
En	Energiestrom	kW
f	Aufteilungsfaktor	
g	Bereitstellungsnutzungsgrad, Normerdbeschleunigung	m/s ²
h	spezifische Enthalpie	kJ/kg
H _U	unterer Heizwert	kJ/kg
I	Investitionssumme	EUR
i	Zinssatz	
K	Kostenstrom	EUR/a
k	exergiespezifische Kosten	EUR/kJ
KEA	kumulierter Energieaufwand	
L	Arbeitskosten	EUR/a
M	Molare Masse	kg/kmol
m	Massenstrom	kg/s
Pa	PAUER-Zahl	
p	Druck	Pa
Q	Wärmestrom	kW
q	spezifische Wärme	kJ/kg

s	spezifische Entropie	kJ/kgK
T	Temperatur	K
u	spezifische innere Energie	kJ/kg
v	Geschwindigkeit, spezifisches Volumen	m/s, m ³ /kg
W	Leistung	kW
w	spezifische Arbeit	kJ/kg
z	Abschreibungsfaktor, Höhe	1/a, m
α	Wartungskostenfaktor	1/a
β	Versicherungskostenfaktor	1/a
ε	Verlustgrad	
ε_K	Zusatzkostengrad	
η	Wirkungsgrad	
η_C	CARNOT-Faktor	
κ	Wichtungsfaktor	
κ_K	exergoökonomischer Wichtungsfaktor	
λ	Verlustbeitrag	
λ_K	Zusatzkostenbeitrag	
ν	Gütegrad	
ξ	Massenanteil	kg/kg
τ_b	Benutzungsdauer	h/a
ϕ	Feedfaktor	
ϕ_K	Feedkostenfaktor	
ω	Basisexergiefaktor	

(B) Indizes (hoch stehend)

Symbol	Bedeutung
A	akkumuliert
B	Basis
CH	chemisch
D+L	exergetische Verluste
E	Element
EK	Eigenkapital
FK	Fremdkapital
H	Personal und Wartung
I	Investition
IN	inputbezogen
KIN	kinetisch
ME	mechanisch
PH	physikalisch
POT	potentiell
Q	Wärme
S	Stoffstrom, System
SS	Subsystem
T	total
TH	thermisch
TS	Gesamtsystem
U	Apparat
W	Arbeit

(C) Indizes (tief stehend)

Symbol	Bedeutung
A	Asche
B	Bezugszustand
D	innerer Verlust (Dissipationsverlust)
EK	Eigenkapital
F	Feed
FK	Fremdkapital
G	Gasgemisch
H	Personal und Wartung
I	Investition
IN	eintretend
irr	irreversibel
i	Zählindex
j	Zählindex
K	Kosten
L	äußerer Verlust
O	Pyrolyseöl
OUT	austretend
P	Produkt
R	Altreifen
S	Einsatzstoff
T	Transit
t	technisch
U	Umgebung bzw. Umgebungszustand, Nutzen
V	direkter äußerer Verlust

W	indirekter äußerer Verlust, Wasser
0	Standardzustand

1 Problemstellung

Die Prozesse der Energie- und Stoffwandlung bilden die Grundlage des Lebens auf der Erde. Hierzu zählen die natürlichen Prozesse, so beispielsweise die Nutzung der Energie der Sonnenstrahlung durch die Photosynthese der grünen Pflanzen. Für die menschliche Gesellschaft sind neben diesen essentiellen Prozessen die technisch-technologischen Verfahren der Stoff- und Energiewandlung bedeutsam, da durch diese das stofflich-energetische Angebot der Natur in Einklang mit den individuellen und gesellschaftlichen Bedürfnissen gebracht werden kann.

Alle Prozesse, natürliche und vom Menschen beeinflusste, sind mit Verlusten bei der Umwandlung verbunden. Aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit über nutzbare Energie und den damit verbundenen ökonomischen Aufwendungen ist eine rationelle Energieverwendung geboten. Vor diesem Hintergrund ist auch die Entwicklung der Thermodynamik einzuordnen, deren Ursprünge in der Auseinandersetzung mit der WATT'schen Dampfmaschine zu suchen sind. Die Beschäftigung mit den naturwissenschaftlichen Hintergründen und der Abstraktion von der Maschine durch CARNOT [CAR24] mündete in der Entwicklung einer neuen Wissenschaftsdisziplin, die im Wechselspiel zwischen Physik und Technik die Erfahrungssätze des ersten und zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik hervorbrachte [PLA30].

Die beiden Hauptsätze der Thermodynamik ermöglichen eine systematische, naturwissenschaftlich begründete Analyse von Prozessen der Energie- und Stoffwandlung, die zwei Zielstellungen verfolgt: Zum einen soll durch die naturwissenschaftliche Betrachtung aus der Vielzahl möglicher Prozessvarianten der Verfahrenstechnik ein für den konkreten Anwendungsfall günstiger Prozessablauf ausgewählt werden. Zum anderen dient die thermodynamische Analyse zur Auseinandersetzung mit den stofflich-energetischen Prozessabläufen, um eine Prozessverbesserung zu erreichen.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die letztgenannte Zielstellung, durch eine detaillierte Analyse die Unzulänglichkeiten der untersuchten Prozesse im Hinblick auf ihre Effektivität und Intensität herauszuarbeiten. Für diese Aufgabenstellung existiert eine Vielzahl von Bewertungsmethoden. Es lassen sich energetische Methoden, die auf dem ersten Hauptsatz basieren, und entropische Bewertungsmodelle, die auf den Aussagen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik aufbauen, unterscheiden [FRA89]. Die exergetischen Bewertungsansätze verbinden die Aussagen der beiden Hauptsätze durch Verwendung der Zustandsgröße Exergie, die den Umgebungszustand mit einbezieht und die Qualität der Energie beschreibt [BAE96]. Dieses Konzept wurde auch dem vorliegenden Ansatz zugrunde gelegt.

Im nachfolgenden Beitrag soll mit Hilfe der Zustandsgröße Exergie eine naturwissenschaftlich basierte Methodik entwickelt werden, die sich sowohl zur Einschätzung der Effizienz von Stoff-

und Energiewandlungen als auch für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit eignet. Dabei steht der Einfluss der Systemstruktur der komplexen Verfahren der Stoff- und Energiewandlung und dessen Bewertung im Mittelpunkt der Betrachtungen. Darüber hinaus soll angesichts aktueller Diskussionen über die Nachhaltigkeit von Aktivitäten der menschlichen Gesellschaft und vor dem Hintergrund eines sich abzeichnenden Klimawandels aufgrund der weiter steigenden Nutzung fossiler Primärenergieträger die gemeinsamen Schnittmengen von Thermodynamik und Ökonomie zur Erfüllung der Bewertungsaufgabe genutzt werden.

1.1 Thermodynamik und Ökonomie

Das ökonomische Agieren ist immer von äußeren Rahmenbedingungen abhängig. Schon in der Definition kommt diese Tatsache zum Ausdruck: Wirtschaften ist Bedürfnisbefriedigung unter Knappheitsbedingungen [ZAB01]. Neben Restriktionen wie knappes Kapital oder dem eingeschränkten Zugriff auf Arbeitskräfte setzen auch die Gesetze der Naturwissenschaften der Ökonomie Grenzen. Die thermodynamische Größe Exergie scheint geeignet, um die Leistungen der Natur als Produktionsfaktor zu berücksichtigen und gleichzeitig den vom zweiten Hauptsatz der Thermodynamik gesetzten Rahmen der Ökonomie, der sich durch die Entropieproduktion bei allen ökonomischen Prozessen und die Problematik der Kuppelproduktion äußert, abzubilden. Darüber hinaus lässt sich die Exergie auch zur Erklärung von Umweltproblemen nutzen, da sie gemeinsame Schnittmengen mit dem Konzept der Nachhaltigkeit aufweist.

1.1.1 Natur und Wirtschaft

Die Natur als die vom Menschen unberührte Sphäre ist für die Menschheit und ihr Wirtschaftssystem essentiell, da sie die notwendigen Lebensbedingungen zur Verfügung stellt. Ein Wirtschaften wird erst möglich durch die Inanspruchnahme von Naturleistungen. So stellt die Natur Ressourcen und Energiequellen zur Verfügung, dient als Aufnahmemedium für Abprodukte, die im Rahmen der Selbstreinigungskräfte wieder in die ökologischen Kreisläufe integriert werden, und agiert als Transformationsdienstleister, wie dies beispielsweise anhand des Wachstums der Nutzpflanzen sichtbar wird [IMM90, IMM93, SIE95, ZAB01].

Die Vorstellungen über das Verhältnis von Natur und Wirtschaft sind vielfältig und spiegeln sich auch in der Geschichte der wirtschaftswissenschaftlichen Lehrmeinungen wider. Schon ARISTOTELES teilte die Wirtschaft in eine von der Natur abhängige „Versorgungswirtschaft“ und eine darauf aufbauende „Handelwirtschaft“ ein. Er ging davon aus, dass nur die Natur als Wirtschaftsfaktor einen Wertzuwachs hervorbringt und daher die „Versorgungswirtschaft“ essentiell ist. In

ähnlicher Weise argumentierten die Physiokraten im 18. Jahrhundert, die die Natur als wichtigsten Produktionsfaktor ansahen, weshalb die Faktoren Arbeit und Kapital nach ihrer Auffassung nur zu einer Effektivierung der Naturleistungen dienen [JAE94].

Die aristotelische „Handelswirtschaft“ hingegen, die im Mittelpunkt der wirtschaftswissenschaftlichen Neoklassik steht, abstrahiert vom Zusammenhang zwischen Natur und Wirtschaft. Es wird davon ausgegangen, dass unbegrenzte Naturressourcen kostenlos für Produktionsprozesse zur Verfügung stehen. Gleichzeitig stellt die natürliche Umgebung ein unbegrenztes, kostenloses Aufnahmemedium für Abfälle dar und organisiert deren Umwandlung und Einbindung in das ökologische System. Da in diesem Modell nur mit Kosten bewertete Stoff- und Energieströme berücksichtigt werden, bleiben die Leistungen des Faktors Natur gänzlich unbeachtet [IMM94]. Alle Kostenströme entstehen durch die Faktoren Arbeit und Kapital, die eine zielgerichtete Einflussnahme auf Prozesse ermöglichen bzw. als Organisationsfaktor der Prozesse in Erscheinung treten [IMM90]. Durch diese verengte Sichtweise auf das Wirtschaftssystem erscheint es rational, die Naturressourcen maximal auszubeuten, da kein Preis der Naturgüter existiert, und alle Abprodukte des Produktionsprozesses dem Naturhaushalt kostenlos aufzubürden [KLA98, ZAB01].

Da jedoch jeder Produktionsprozess ohne weiteres als ein Bearbeiten von Naturressourcen aufgefasst werden kann, ist es sinnvoll, die natürlichen Rahmenbedingungen bei der Betrachtung ökonomischer Prozesse zu berücksichtigen und explizit in eine Bewertung einzubeziehen [IMM94].

1.1.2 Einfluss des Entropiegesetzes

Zu den oben erwähnten Rahmenbedingungen der Ökonomie gehören die Hauptsätze der Thermodynamik. Neben dem Energieerhaltungssatz kommt dem zweiten Hauptsatz bei der Betrachtung ökonomischer Prozesse eine besondere Bedeutung zu, da sich mit dem Entropiegesetz ein ökonomischer Wertbegriff ableiten lässt.

Die Entropie charakterisiert, unabhängig davon, ob die Größe thermodynamisch [FRA99] oder statistisch [SCL00] formuliert wird, einen Ordnungszustand in einem System. Das Auftreten von Irreversibilitäten in allen realen Prozessen vergrößert demnach zwangsläufig die Entropie des betrachteten Systems. Jeder ökonomische Produktions- oder Konsumtionsprozess ist aus thermodynamischer Sicht als ein irreversibler Prozess zu bezeichnen, der mit einer entsprechenden Entropieproduktion einhergeht. Die aufsummierte Entropie aller Haupt-, Neben- und Abprodukte eines Produktionsprozesses ist stets größer als die der eingesetzten Faktoren [GEO71, GEO87]. Die Entwertung der Produkte durch die Konsumtion ist ebenfalls mit einer Entropieproduktion verbunden.

Mit dieser Betrachtungsweise lässt sich jedes ökonomische System als offen und irreversibel charakterisieren, da thermodynamisch gesehen, natürliche, niedrigentropische Ressourcen unter Einsatz von Kapital und Arbeit in Produkte und hochentropische Abfälle umgewandelt werden [BAU01, BIN94, END00]. Übertragen auf die exergetische Betrachtungsweise zeichnen sich ökonomische Prozesse, die der Schaffung von Gebrauchswerten für die Bedürfnisbefriedigung dienen, durch eine stetige Exergiezufuhr von außen, das Auftreten von Exergieverlusten und die Abgabe von exergiearmen Abprodukten in die Umgebung aus [SCI01].

Die ökonomischen Prozesse sind damit durch Zustände beschreibbar, die als weit entfernt vom thermodynamischen Gleichgewicht angesehen werden müssen [SAR99]. Folglich lässt sich ein ökonomisches System auch als dissipative Struktur beschreiben. Es ist mit der Funktionsweise jedes Lebens auf der Erde, das ebenfalls als offenes, dissipatives System nur durch Zufuhr von niedrigentropischer Sonnenstrahlung und Abfuhr von hochentropischer Wärmestrahlung möglich ist, vergleichbar [DIN01, DIN02, HEM94, ROS02, ROS03].

Darüber hinaus ist eine geringe Entropie der eingesetzten Ressourcen die Voraussetzung für die ökonomische Verwertbarkeit. Somit eignet sich die Entropie dieser Ressourcen und der Produkte als ökonomischer Wertmaßstab: Je geringer die Entropie eines Stoff- oder Energiestroms, desto höher sein ökonomischer Wert. GEORGESCU-ROEGEN stellt zu Recht fest: „Thermodynamics are physics of economic value“ [GEO71]. Aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik folgt ebenfalls, dass dissipierte Materie nur durch einen hohen Aufwand an Exergie – und damit nur durch einen großen ökonomischen Aufwand – wieder gewonnen werden kann [GEO87]. Folglich lässt sich auch die Zustandgröße Exergie als Wertmaßstab benutzen: Je größer die Exergie eines Stoff- oder Energiestroms, desto höher auch sein ökonomischer Wert, da die Exergie als thermodynamisches Qualitätsmaß die Umwandlungsfähigkeit unter gegebenen Umgebungsbedingungen beschreibt [ROS93]. Jedoch bildet die Exergie lediglich einen thermodynamisch begründbaren Wert ab, so dass ein darüber hinaus gehender Wertbegriff, der auch andere Faktoren wie Ästhetik, Design, persönliche Präferenzen mit einbezieht, nicht enthalten ist [KLA98, SOE96, TSA93, VAL02c].

1.1.3 Kuppelproduktion

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik und die daraus folgende Irreversibilität der ökonomischen Prozesse führen dazu, dass stets mehrere Outputströme an Produkten gleichzeitig erzeugt werden [MUE95]. Das Ergebnis von Produktionsprozessen ist daher nie als Ein-Produkt-Fall, den die wirtschaftswissenschaftliche Literatur bevorzugt behandelt, sondern immer als Kuppelproduktion zu charakterisieren [OEN97]. Laut einer Definition nach RIEBEL gehen bei einer Kuppelpro-

duktion „aus einem einzigen gemeinsamen Produktionsprozess (...) aus natürlichen oder technischen Gründen zwangsläufig zwei oder mehr unterschiedliche Produkte hervor“ [OEN97].

Nach einer Kuppelproduktion lassen sich hinsichtlich ihrer Erwünschtheit, ihrer physikalischen Eigenschaften und ihrer Nutzungsmöglichkeiten unterscheiden:

- Hauptprodukte, die das eigentliche Unternehmensziel bestimmen,
- Nebenprodukte, die als nutzbares Kuppelprodukt eingeordnet werden und
- Abprodukte, die als nicht nutzbares Kuppelprodukt angesehen werden und gegebenenfalls mit Entsorgungskosten verbunden sind [OEN97].

Die Einteilung in diese Kategorien hat Auswirkungen auf die Wertschätzung und die Kostenverteilung zwischen den gekoppelt erzeugten Produkten. Da die anfallenden Abprodukte von Produktionsprozessen nicht mit Kosten belastet werden und damit ökonomisch irrelevant sind, wird auch ihre Bedeutung für mögliche Umweltprobleme unterschätzt [BAU01a, BAU01b].

1.1.4 Umweltprobleme und Sustainability

Die Beeinträchtigung der natürlichen Umgebung durch Abprodukte ökonomischer Prozesse und durch die ökonomischen Prozesse selbst kann zu einschneidenden Störungen des ökologischen Gleichgewichts führen und Umweltprobleme hervorrufen. Als Auswirkungen der menschlichen Wirtschaftsaktivitäten sind beispielsweise

- der Klimawandel,
- die übermäßige Aneignung von Biomasse,
- der Abbau der Ozonschicht,
- die Degradation von Böden und
- die Abnahme der Biodiversität

zu nennen [COS01, WEI96]. Durch die massiven Umweltprobleme bedingt wurde in den Wirtschaftswissenschaften das Konzept von Sustainability, das die Nachhaltigkeit einer Wirtschaftsweise untersucht, entwickelt [DIN01, FER02, LEM03, SAR99, WAL97].

Der Begriff der nachhaltigen Wirtschaftsweise wurde zunächst nur in der Forstwirtschaft verwendet, bevor er, initiiert durch den BRUNDTLAND-Bericht der UN-Kommission für Umwelt und Entwicklung, auf die Wirtschaft insgesamt übertragen wurde [BUN97, ENQ93, STE02]. Unter Sustainability versteht man eine Wirtschaftsweise, die ökonomische, soziale und ökologische Stabili-

täts- und Entfaltungskriterien berücksichtigt [ZAB01]. Durch die Dreieinigkeit von Ökonomie, Soziologie und Ökologie im Konzept wird nicht nur die Zielstellung einer stabilen wirtschaftlichen Entwicklung verfolgt, sondern auch eine gerechte Verteilung der Lebenschancen (intra- und intergenerative Gerechtigkeit) gefordert. Die ökologischen Forderungen des Konzeptes zielen auf eine minimale Nutzung nichterneuerbarer Ressourcen, auf die Nutzung erneuerbarer Ressourcen sowie auf den Erhalt der Naturleistungen [BUN97, STE02, WEI96, ZAB01].

Es existieren einige gemeinsame Schnittmengen zwischen dem Exergiekonzept und dem Konzept von Sustainability, da beide Konzepte einen interdisziplinären Charakter haben [DIN01]. Eine wichtige Gemeinsamkeit ist die Tatsache, dass jeweils ein Bezug zur Umgebung des betrachteten Produktionssystems hergestellt wird, so dass die eingesetzten Ressourcen als Exergieströme modelliert werden können. Die Exergie als Qualitätsmaß von Energien und Stoffen korrespondiert mit dem Wert der Stoffe und Energien im ökonomischen Sinne. Die in den Systemen auftretenden inneren und äußeren Exergieverluste können als Indikator für die Effizienz und den Einfluss des untersuchten Systems auf Umgebung genutzt werden, so dass externe Effekte in beiden Konzepten berücksichtigt werden [SIE95].

Die genannten Zusammenhänge zwischen Exergie und Sustainability lassen sich für eine naturgesetzlich begründbare Kostenrechnung und eine daraus ableitbare Preisbildung nutzen. Dies würde wiederum in Richtung einer naturgesetzlichen Steuerung der Produktionsaktivitäten durch entsprechende, dem Nachhaltigkeitsprinzip folgende Preise wirken [WOR04]. Im Hinblick auf die geforderte intra- und intergenerative Gerechtigkeit als soziale Komponente von Sustainability ist eine Verteilung der Ressourcen mit Hilfe der Exergie denkbar.

1.2 Ökonomische Modellvorstellungen

Die vorgestellten thermodynamisch-ökonomischen Zusammenhänge lassen sich für eine Modellbildung nutzen. Ausgehend vom einfachen neoklassischen Wirtschaftsmodell, das externe Einflüsse unberücksichtigt lässt, sollen die naturwissenschaftlichen Restriktionen in die ökonomische Modellwelt eingebunden und schließlich ein exergetisches Wirtschaftsmodell abgeleitet werden.

1.2.1 Neoklassisches Wirtschaftsmodell

Dieses Modell beschreibt als abgeschlossenes Kreislaufmodell einer Ökonomie die Verflechtungen, die zwischen dem Produktionssektor, dem die Unternehmen angehören, und dem Konsumtionssektor, zu dem die privaten Haushalte zählen, existieren [HAL01]. Im Produktionssektor werden

Werte generiert, während mit dem Konsum der erzeugten Produkte eine Wertvernichtung einhergeht.

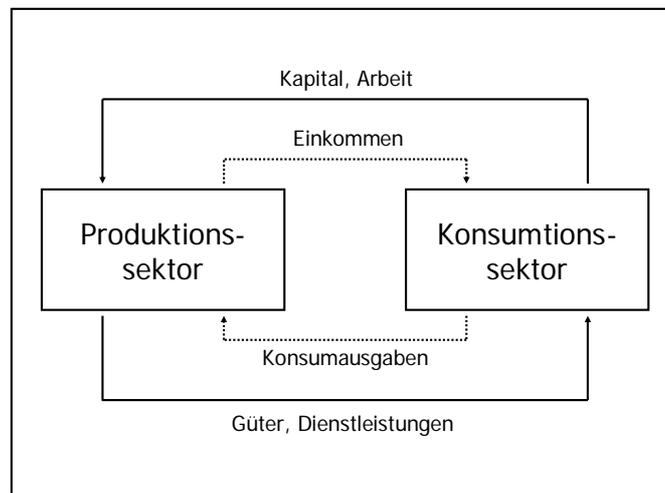


Abbildung 1.1: Neoklassisches Wirtschaftsmodell

Im Modell werden monetäre und materielle Strombeziehungen zwischen den Sektoren abgebildet. Der Produktionssektor liefert an die Haushalte Güter und Dienstleistungen und erhält im Gegenzug von den Haushalten monetäre Mittel in Form von Konsumausgaben. Auf der anderen Seite stellen die privaten Haushalte Kapital und Arbeit den Unternehmen zur Verfügung, was mit einem entsprechenden Einkommen vergütet wird.

Charakteristisch für diese Modellvorstellung ist die Fixierung auf monetär bewertbare Geld- und Güterströme, so dass die Naturleistungen gänzlich aus dem ökonomischen Prozess ausgeblendet werden. Die Ökonomie wird als isolierter, geschlossener und ahistorischer Prozess betrachtet [GEO71]. Somit existiert in der Modellwelt eine strikte Trennung zwischen Ökonomie und Ökologie [IMM98]. Darüber hinaus zeigt sich eine mechanistische Beschreibung der ökonomischen Beziehungen, die die Annahme des Menschenbilds des „homo economicus“ [ZAB01] erfordert. Das hier zugrunde gelegte Menschenbild beschreibt die handelnden Akteure als Individualisten, die egoistisch und rational ihr Ziel der Nutzenmaximierung anstreben und keinerlei anderes Präferenzverhalten zeigen.

Durch diese Annahmen erhält man ein funktionierendes mathematisches Modell, das zur Erklärung ökonomischer Zusammenhänge im Rahmen der abgeschlossenen Kreisläufe genutzt werden kann. Durch die Konzentration auf monetär abbildbare Ströme werden im neoklassischen Wirtschaftsmodell alle Güter und Dienstleistungen vernachlässigt, die nicht mit Kosten belastet sind und thermodynamische Gesetzmäßigkeiten ausgeblendet. Die oben diskutierten naturgesetzlichen Randbedingungen (Naturleistungen, Entropiegesetz, Kuppelproduktion) werden im Modell nicht

berücksichtigt. Folglich werden auch die sozialen und ökologischen Auswirkungen des Wirtschaftens vom Modell nicht erfasst. So tragen die Ressourcen den Charakter eines „freien Gutes“, d.h. sie stehen kostenlos für die ökonomische Verwertung zur Verfügung. Ähnlich verhält es sich mit Abfällen, die in der Modellvorstellung als „externe Effekte“ auftreten, aber ebenfalls keine Kosten verursachen. Damit entziehen sich die Naturgüter und Abprodukte dem zugrunde liegenden Entscheidungskalkül, den Kosten. Dies führt letztendlich zu der Konsequenz, dass die Maximierung des Naturverbrauches und die Übernutzung der Natur im Modell ökonomisch rational sind [ZAB01]. Die Anwendung des neoklassischen Modells erscheint für eine umfassende Betrachtung der ökonomischen Auswirkungen ungeeignet, weshalb entsprechende Erweiterungen in der Modellwelt notwendig sind

1.2.2 Ökonomisch-ökologisches Modell

Die Einbeziehung des Produktionsfaktors Natur zur Erweiterung des neoklassischen Modells verdeutlicht das ökonomische System als offenes System, das von Material- und Energieflüssen durchströmt wird [DYC00]. Mit dieser Erweiterung werden ökonomische Betrachtungen nicht nur auf die Faktoren Arbeit und Kapital beschränkt [IMM98]. Die der ökologischen Systemumgebung entnommenen Ressourcen unterliegen im ökonomischen System vielfältigen Produktions- und Konsumtionsprozessen, ehe sie als Abfall oder Abwärme wiederum in die ökologische Systemumgebung abgegeben werden. Daher ist das ökonomische System in das ökologische System als Subsystem eingebunden [BIN94, COS01, IMM93].

Das ökologische System ist thermodynamisch gesehen ein System zur Nutzung des Energiezuflusses der Erde sowie der Weiter- und Wiedernutzung der Materie, das von der niedrigentropischen Sonnenstrahlung angetrieben wird und Entropie in Form von Abwärme in das Weltall abstrahlt. Durch den Bezug auf die Umgebung des ökonomischen Systems werden in diesem erweiterten Modell auch die Hauptsätze der Thermodynamik eingebunden. Der erste Hauptsatz ist für die Beschreibung der Stoff- und Energieflüsse anzuwenden. Zusätzlich erfolgt eine Bewertung der Qualität der eingesetzten Ressourcen, die Beschreibung des Prozessablaufs und seiner Effektivität mit Hilfe des zweiten Hauptsatzes. Damit gelingt die geforderte Integration von naturwissenschaftlichen Ansätzen in das ökonomische Modell [BAU01b, HAL01, SOE96, STR87].

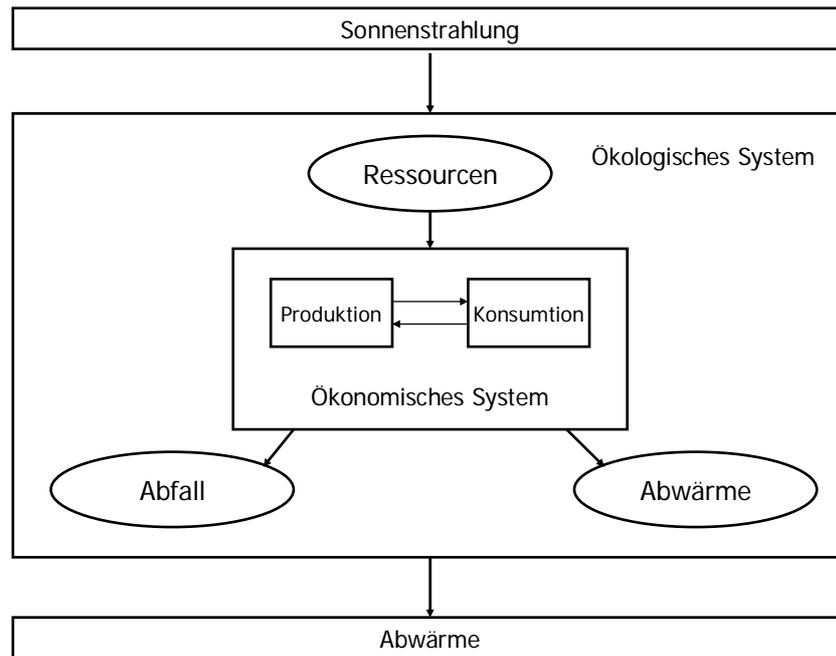


Abbildung 1.2: Ökonomisch-ökologisches Modell

Im Gegensatz zum neoklassischen Modell sind die oben umrissenen Zusammenhänge zwischen Thermodynamik und Ökonomie in der Modellvorstellung mit enthalten. Dies hat den Vorteil, dass die Ressourcen, die aus der ökologischen Systemumgebung entnommen werden, im Modell berücksichtigt werden und anstelle des „Freien Gut“-Charakters auch eine Ressourcenbesteuerung modelliert werden kann. Ein ähnlicher Effekt lässt sich auf der Seite der Abprodukte konstatieren, da die „Externen Effekte“ im Modell enthalten sind und beispielsweise die Kosten der CO₂-Zertifikate verursachen [ZAB01].

1.2.3 Exergetisches Wirtschaftsmodell

Die im ökonomisch-ökologischen Modell demonstrierte Einbeziehung der Naturwissenschaften in eine ökonomische Modellierung lässt sich mit Hilfe der Exergie konkretisieren. Wie aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ableitet werden kann, repräsentiert die Exergie als thermodynamisches Qualitätsmaß auch einen ökonomischen Wert und kann daher zur Beschreibung von Wirtschaftsprozessen dienen.

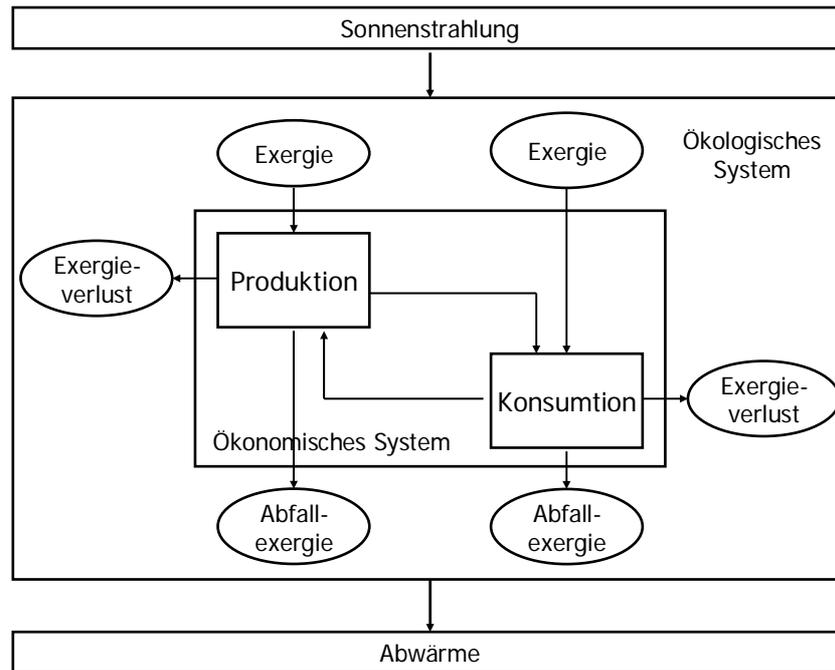


Abbildung 1.3: Exergetisches Wirtschaftsmodell

Die Abbildung zeigt, dass bei dieser Modellierung die aus dem ökologischen System entnommenen Ressourcen mit ihrer Exergie in das Wirtschaftssystem einfließen. Innerhalb der Ökonomischen Systems finden vielfältige Umwandlungsprozesse statt, die mit Exergieverlusten aufgrund von Irreversibilitäten verbunden sind und zu einer Abgabe von Abfall-Exergie an das ökologische System führen. Damit gelingt anhand dieser Modellvorstellung

- die Charakterisierung der Wirtschaftssphäre als offenes, durchströmtes System,
- die Einbeziehung der (ökologischen) Systemumgebung als Einflussgröße,
- die Bewertung der Qualität der eingesetzten Ressourcen,
- die Einschätzung der Effizienz der Umwandlung auf naturgesetzlicher Basis sowie
- die Berücksichtigung von Kuppelproduktionen.

Eine exergetische Betrachtung ist für den Produktionssektor tendenziell sinnvoller, da hier ein quantifizierbares exergetisches Produkt erzeugt wird. Der konsumtive Teil der Ökonomie entzieht sich weitestgehend einer solchen Bewertungsstrategie, da die Bedürfnisbefriedigung mit einer Entwertung der produzierten Güter einhergeht und sich daher schlecht mit thermodynamischen Gütekennzahlen quantifizieren lässt. Im Folgenden wird daher der Fokus auf die Produktionssphäre gelegt und versucht, diese mit exergetischen und exergoökonomischen Analyse- und Bewertungsmethoden zu untersuchen [HAU04a, WAL01a].

1.3 Modellierung von Systemen

Die eingangs genannten Verfahren der Stoff- und Energiewandlung zeichnen sich infolge der Verwendung einer Vielzahl von Apparaten und der Nutzung vielfältiger Grundoperationen durch eine hohe Komplexität aus [VAU94]. Um die Funktionsweise zu beschreiben und eine Analyse vorzunehmen zu können muss notwendigerweise von der Realität abstrahiert werden. Daher wird im Folgenden vom kybernetischen Systembegriff ausgegangen, der als System die „Menge von Elementen und Menge von Relationen, die zwischen diesen Elementen besteht“ [GRU76] versteht. Die nachstehende Abbildung soll dies verdeutlichen [GRU76]:

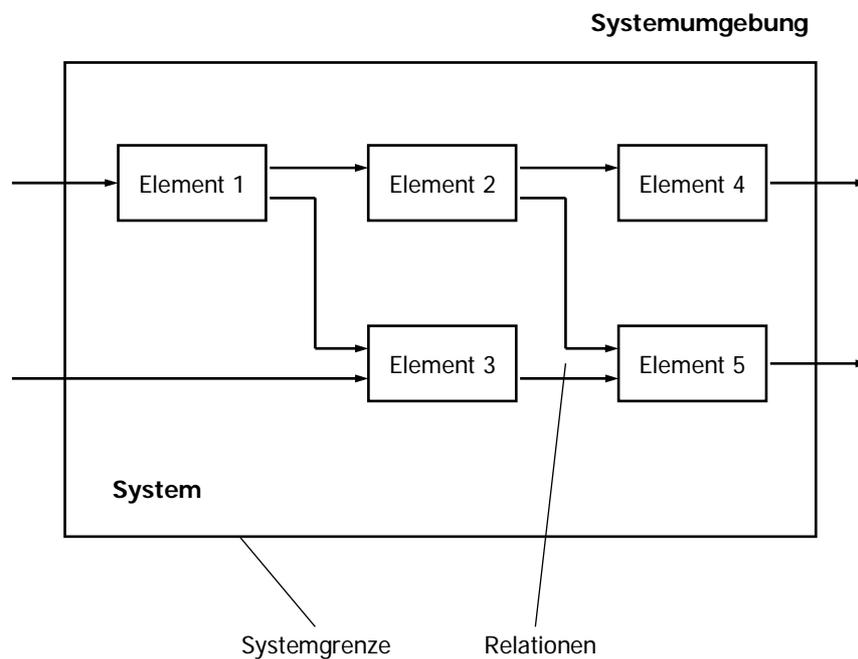


Abbildung 1.4: Modell eines Systems

In den Elementen eines Systems laufen die Transformationsprozesse, d.h. eine Umwandlung von Eingangs- in Ausgangsgrößen, ab. In verfahrenstechnischen Systemen sind dies die Prozesse der Stoff- und Energiewandlung, die im Folgenden auf ihre Effizienz und Wirtschaftlichkeit hin untersucht werden sollen. Die Komplexität des Systems wird durch die Anzahl der Elemente und ihrer Wechselwirkungen charakterisiert.

Die Elemente sind durch Relationen, die im verfahrenstechnischen Sinne die Stoff- und Energieströme darstellen, untereinander verbunden. Die Relationen beschreiben die Struktur eines Systems, wobei ihre Anzahl ein Ausdruck der Komplexität des Systems ist. Das betrachtete System ist von seiner Umgebung durch die gedachte Systemgrenze getrennt. Die Kopplung mit der Systemumgebung geschieht durch Eingangs- und Ausgangsströme des Systems, die gleichzeitig die Funktion des Systems bestimmen [GRU76].

Zur Beschreibung eines Systems steht eine Vielzahl von Modellen zur Verfügung, die sich hinsichtlich der Akzentsetzung auf einzelne Systemeigenschaften gliedern lassen [ROP99]. Mit dem funktionalen Konzept wird das System als „Black Box“ aufgefasst und seine Eigenschaften als Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen und den Ausgangsgrößen sowie mit den Zuständen des Systems beschrieben. Das strukturelle Konzept dagegen erfasst das System als Menge der verknüpften Elemente und berücksichtigt besonders die Relationen und Abhängigkeiten zwischen den Elementen. Die Graphentheorie ist ein Beispiel für dieses Konzept, wobei hier die Stoff- und Energiewandlungen in den Knoten des Graphen einzuordnen sind und die Stoff- und Energieströme als Relationen zwischen den Knoten fließen. Auch die Bilanzierung von Systemen lässt sich hier einordnen. Das hierarchische Konzept der Systembeschreibung geht davon aus, dass jedes System Teil eines Supersystems ist und gleichzeitig in Subsysteme zerlegt werden kann, um eine tiefere Beschreibung zu ermöglichen [HEB86, ROP99].

1.3.1 Bilanzierung

Die Beschreibung eines Systems erfordert die Kenntnis der inneren Prozesse sowie der Beziehungen zwischen dem System und der Systemumgebung. Eine Bilanzierung der in das System eintretenden und aus dem System austretenden Ströme bildet diese Relationen ab. Dazu wird das System als Bilanzraum und die Systemgrenze als Bilanzkreis betrachtet [GRU76, GRU78].

Hinsichtlich des Verhaltens der ein- und austretenden Stoff- und Energieströme des Bilanzraumes lassen sich stationär und instationär durchströmte Systeme unterscheiden. In instationären Systemen verändern sich die physikalischen Kenngrößen der Stoff- und Energieströme in Abhängigkeit von der Zeit, was beispielsweise auch durch Speichervorgänge im System verursacht werden kann. In den folgenden Betrachtungen wird immer von einem stationären Zustand des zu untersuchenden Systems ausgegangen.

Für die Einschätzung der stofflichen Beziehungen zwischen der Umgebung und dem Bilanzraum ist die Formulierung einer Massenbilanz zweckmäßig. Da für die betrachteten stationären Prozesse der Energie- und Stoffwandlung die Massenerhaltung gilt, folgt:

$$\sum_i \dot{m}_{IN,i} = \sum_j \dot{m}_{OUT,j} \quad (1.1)$$

Eine noch detaillierte Beschreibung der Wechselwirkungen liefern die Komponentenbilanzen, die ein- und austretende Komponenten wie beispielsweise Atomarten betrachtet und ebenfalls der Erhaltung unterliegt. Hierbei wird für jede stoffliche Komponente in den Massenströmen eine

gesonderte Bilanz aufgestellt. Neben dem stofflichen Austausch zwischen System und Umgebung existieren energetische Wechselwirkungen, die in einer Energiebilanz erfasst werden:

$$\sum_i (\dot{m}_{IN,i} h_{IN,i}) + \dot{Q}_{IN} + \dot{W}_{IN} = \sum_i (\dot{m}_{OUT,i} h_{OUT,i}) + \dot{Q}_{OUT} + \dot{W}_{OUT}. \quad (1.2)$$

Darüber hinaus können noch weitere thermodynamische oder ökonomische Größen zur Bilanzierung eines Systems genutzt werden, so dass auch Exergie- oder Kostenbilanzen aufgestellt werden können. Die Voraussetzung für diese Bilanzierungsformen ist neben der Festlegung der Bilanzraumgrenze immer die Kenntnis der entsprechenden Kenngrößen der Stoff- und Energieströme, so dass ein Fließschema und Auslegungs- und Betriebsdaten bekannt sein müssen [FRS02].

Derartige Bilanzen können für unterschiedliche Objekte aufgestellt werden, so dass neben der Betrachtung von einzelnen Prozessen auch Verfahren oder Unternehmensstandorte bilanziert werden können [BUN96]. Auch eine Betrachtung einzelner Produkte mit Hilfe einer Produktbilanz ist möglich. Darüber hinaus können Produktlebenszyklusbetrachtungen zur Bewertung der gesamten, mit dem Produkt verbundenen Aufwendungen herangezogen werden [DYC00].

1.3.2 Hierarchisch strukturierte Systeme

In den bisher vorgestellten Möglichkeiten der Bilanzierung wurden nur gleichrangige Bilanzräume behandelt. Da es sich bei den Verfahren der Energie- und Stoffwandlung um komplexe Systeme handelt, ist eine strukturierte Bilanzierung vorteilhaft. Dazu wird das zu untersuchende Verfahren in Struktureinheiten zerlegt, wobei zusätzlich eine Hierarchie dieser Struktureinheiten eingeführt wird.

Hierfür wird das Verfahren, das auch die Gesamtsystemebene in der Hierarchie bildet, in Verfahrensschritten zerlegt, die als Teilsysteme oder Teilsystemebene bezeichnet werden. Diese Teilsysteme lassen sich wiederum in einzelne Prozesse der Stoff- und Energiewandlung aufspalten. Da diese Prozesse in Apparaten realisiert werden, wird die dritte Hierarchiestufe als Apparateebene bezeichnet. Daher ergibt sich für diesen Fall eine dreistufige Hierarchie des Verfahrens, wie sie in Abbildung 1.5 skizziert ist [GRU76, HEB86, HEB90, HEB03].

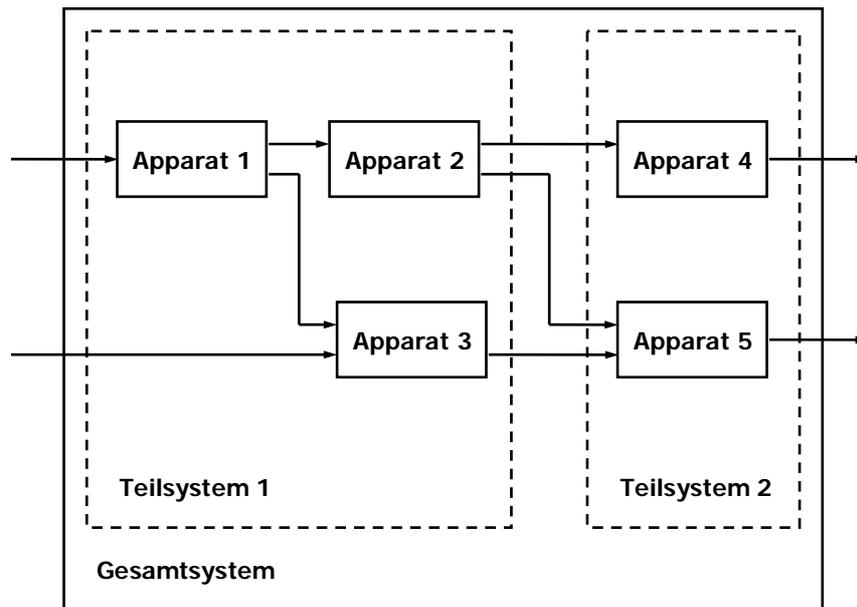


Abbildung 1.5: Hierarchische Systemstruktur

Diese Vorgehensweise lässt sich auch prinzipiell weiter in Richtung von Teilprozessen fortsetzen und wird im Wesentlichen durch die zur Bilanzierung notwendigen Messdaten der Struktureinheiten begrenzt. Auch in der entgegengesetzten Richtung lässt sich die Strukturierung fortsetzen und es lassen sich Hierarchieebenen des Unternehmensstandortes, von Verfahrensgruppen oder einer Volkswirtschaft definieren. In dieser Arbeit wird das Verfahren nur auf den Hierarchieebenen „Gesamtsystem“, „Teilsystem“ und „Apparat“ untersucht.

1.4 Bewertungserfordernisse und -ziele

Die Zielstellung der zu entwickelnden Bewertungsmethodik lässt sich in einen thermodynamischen und einen ökonomischen Teil unterteilen. Im Hinblick auf eine thermodynamische Bewertung des Verfahrens ist eine Methode, die sowohl den ersten Hauptsatz als auch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik einbezieht, zu entwickeln, die

- die Einschätzung der Effizienz der Stoff- und Energiewandlung,
- die Lokalisierung der Verluste im Verfahren,
- die Bewertung des Verfahrens, der Verfahrensschritte und der Einzelprozesse sowie deren Bedeutung im System und
- die Bewertung von Stoff- und Energieströmen in komplexen Systemen

leistet. Zur ökonomischen Einschätzung, die auf den Ergebnissen der thermodynamischen Bewertung aufbaut und explizit thermodynamische Zusammenhänge berücksichtigt, gehört

- die Analyse der Kostenentstehung im Verfahren,
- die Erarbeitung einer naturwissenschaftlich begründbaren Kostenrechnung nach dem Verursacherprinzip,
- die Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens, der Verfahrensschritte und der Einzelprozesse sowie deren Interdependenzen im System und
- die Einschätzung des ökonomischen Aufwandes für die Erzeugung von Stoff- und Energieströmen in komplexen Systemen.

Zur Erfüllung der mit der Methode verfolgten Ziele ist als erster Schritt die Definition des Untersuchungsrahmens erforderlich. Dazu muss das zu betrachtende Verfahren von seiner Umgebung durch einer Bilanzgrenze, die das gesamte Untersuchungsobjekt einschließt, abgegrenzt werden. Im Zuge dieser Vorüberlegungen muss auch der Genauigkeitsgrad der Analyse festgelegt werden, der durch eine Einschätzung der Güte der vorliegenden und der erhebbaren Daten des Systems beeinflusst wird.

Danach schließt sich die Erstellung eines Fließbildes des Verfahrens an, wozu alle Prozesse im Verfahren und ihre Relationen untereinander und mit der Systemumgebung berücksichtigt werden müssen. Die anschließende Gliederung des Verfahrens in die Struktureinheiten „Teilsystem“, wo Prozesse zu Verfahrensschritten zusammengefasst werden, und „Apparat“ ermöglicht eine Hierarchiebildung im System.

Das somit vorliegende strukturierte Fließbild verdeutlicht die Abläufe des zu analysierenden Verfahrens und zeigt die Stoffe und Energien, die im System umgewandelt werden. Damit können die zur Bilanzierung der Struktureinheiten notwendigen Daten zusammengestellt werden. Mit dem Datenmaterial kann die thermodynamische Analyse des Verfahrens und seiner Struktureinheiten erfolgen und es können Kennzahlen für eine vergleichende Bewertung gebildet werden. In gleicher Weise wird bei der ökonomischen Einschätzung der Prozesse vorgegangen. Anschließend stehen die Kennzahlen für eine Interpretation und zur Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen zur Verfügung.

Damit stellen sich folgende Aufgaben für die Ableitung einer Bewertungsmethode:

- Erläuterung der zugrunde liegenden thermodynamischen und ökonomischen Bewertungsgrößen,
- Definition von thermodynamischen und ökonomischen Effektivitätskennzahlen,

- Übertragung dieser Kennzahlen auf komplexe System und Integration der Systemstruktur in die Bewertungsmethode,
- Definition von hierarchisch strukturierten Bewertungskennzahlen und
- Interpretation der erzielten Aussagen.

1.5 Aufbau der Arbeit

Den Ausgangspunkt der Untersuchung bildeten die in der Problemstellung untersuchten Zusammenhänge, die zwischen der Thermodynamik als Naturwissenschaft und der Ökonomie als Gesellschaftswissenschaft existieren. Neben den Rahmenbedingungen, die die Naturwissenschaften der Ökonomie stellen, wurden Modellvorstellungen über die Beziehungen zwischen Natur und Wirtschaft diskutiert und Anforderungen an eine ökonomische Bewertung mit Hilfe der Exergie formuliert sowie auf die Möglichkeiten der Modellierung von Verfahren der Stoff- und Energiewandlung eingegangen. Es wurden die notwendigen Rahmenbedingungen für eine Bewertungsmethodik dargestellt und die Zielstellungen der exergoökonomischen Bewertung angegeben.

Die Bewertungsmethode besteht aus einer thermodynamischen und aus einer ökonomischen Dimension. Die Grundlage der gewählten Methode bildet die exergetische Bewertung, auf die die ökonomische Analyse aufbaut. Folglich wird auch in der vorliegenden Arbeit zuerst die exergetische Methode näher beleuchtet. So wird im zweiten Kapitel zunächst die Exergie als thermodynamische Zustandsgröße und der dazu notwendige Umgebungszustand betrachtet. Daran schließt sich die Beschreibung der mit dieser Größe aufstellbaren Exergiebilanzen an, die die Bewertung und Ableitung von Kennzahlen für definierte Bilanzräume ermöglichen. Um aussagefähige Kennzahlen zu erhalten, wird die Methode der exergetischen Transitbereinigung angewandt. Im Hinblick auf die Bewertung komplexer Systeme sind einige Besonderheiten zu berücksichtigen, die im Fokus des letzten Abschnittes des Kapitels stehen. Nach der Diskussion von Fragen der Verlustaufteilung und der besonderen Behandlung der äußeren Exergieverluste des Systems werden spezielle systembezogene Kennzahlen abgeleitet. Zusätzlich wird an dieser Stelle das Konzept der Basisexergie und der akkumulierten Exergieverluste vorgestellt und eine weitere Bewertungsgröße formuliert mit dem Ziel, Exergieströme im System einzuschätzen. Der Vergleich mit alternativen Bewertungskonzepten schließt das Kapitel zur exergetischen Bewertung ab.

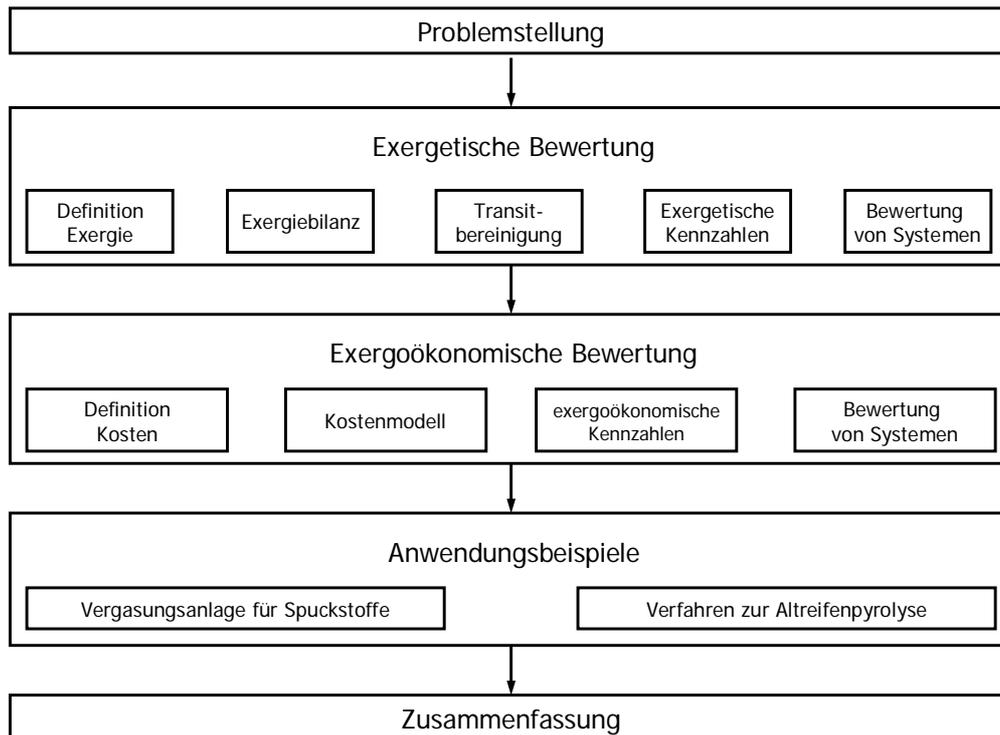


Abbildung 1.6: Struktur der Arbeit

Im darauf folgenden Kapitel werden ausgehend von der rein exergetischen Analyse und Bewertung zusätzlich ökonomische Aspekte mit einbezogen und die exergoökonomische Bewertung entwickelt. Nach der Beschreibung der betrachteten Kostenarten wird das exergoökonomische Kostenmodell vorgestellt, das Basis- und Zusatzkosten unterscheidet. Mit diesem Modell lassen sich Kennzahlen zur Einschätzung der Wirtschaftlichkeit von Systemelementen treffen. Bei der Bewertung komplexer Systeme sind wiederum Besonderheiten zu berücksichtigen, die die Behandlung der Zusatzkosten im System, den Einfluss der Transitbereinigung und die Kostenallokation betreffen. Es werden systembezogene Kennzahlen definiert und mit alternativen Bewertungsmodellen verglichen.

An die theoretischen Überlegungen einer Analyse und Bewertung schließt sich die Anwendung der Methode anhand zweier Beispiele an. Nach einer knappen Darstellung der rechentechnischen Umsetzung werden die Ergebnisse der exergoökonomischen Analyse und Bewertung einer Vergasungsanlage für Abfallstoffe aus der Papierindustrie und eines Verfahrens zur Pyrolyse von Altreifen vorgestellt und interpretiert.

2 Exergetische Bewertung

In diesem Abschnitt wird zunächst die thermodynamische Zustandsgröße Exergie betrachtet. Danach werden die Grundlagen der exergetischen Bilanzierung abgeleitet. Die vorgestellten Bewertungsziele erfordern die Diskussion der exergetischen Transitbereinigung und die Ableitung einer Vorgehensweise zur Bewertung strukturierter Systeme.

2.1 Exergie als thermodynamische Bewertungsgröße

Die wissenschaftliche Betrachtung der Prozesse, auf deren Grundlage Dampfmaschinen arbeiten, wird mit dem Namen CARNOT verbunden. Sein 1824 herausgegebenes Werk „Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen“ [CAR24] legte den Grundstein für die Entwicklung der Thermodynamik als Wissenschaftsdisziplin. Schon in diesem Werk sind Beobachtungen und Abstraktionen beschrieben, die sich in der Zustandsgröße Exergie wieder finden. CARNOT schreibt von der Erzeugung einer „bewegenden Kraft“ als Zielgröße einer Dampfmaschine und analysiert die Ursache: „Erzeugung von Bewegung [...] bei Dampfmaschinen [...] ist die Wiederherstellung des Gleichgewichts des Wärmestoffes“ [CAR24] von höherer zu niedriger Temperatur. Er folgerte, dass „überall, wo ein Temperaturunterschied besteht, [...] auch die Erzeugung bewegender Kraft stattfinden“ [CAR24] kann. Damit erkannte er die Notwendigkeit von Potentialunterschieden für die Bereitstellung von Arbeit, wobei er den Temperaturunterschied als eine „Fallhöhe“ des Wärmestoffes darstellt. Darüber hinaus finden sich in seinem Werk Aussagen, inwieweit der Temperaturunterschied die Erzeugung von Arbeitsleistung beeinflusst: „Der Fall des Wärmestoffes bringt bei niedrigen Graden der Temperatur mehr bewegende Kraft hervor als bei höheren Graden“ [CAR24]. Weiterhin leitete er Grundsätze für die Auslegung einer Dampfmaschine ab, nämlich einen „großen Fall des Wärmestoffes“ [CAR24] zu realisieren. Folglich muss die zugeführte Wärme zum Prozess auf einem möglichst hohen Temperaturniveau erfolgen, die abgearbeitete Wärme auf einem möglichst niedrigen Niveau an die Umgebung abgegeben werden. Er skizzierte die Definition eines Verlustes als „Wiederherstellung des Gleichgewichts des Wärmestoffes [...] ohne Hervorbringung“ einer „bewegenden Kraft“ [CAR24]. Auch erkannte er, dass naturwissenschaftliche Begrenzungen bei den Energieumwandlungen existieren und eine ideal arbeitende Maschine nicht realistisch ist: „Man darf nicht hoffen, in der Praxis jemals alle bewegende Kraft der Brennmaterialien auszunutzen“ [CAR24].

Zusammenfassend lassen sich schon in der Arbeit von CARNOT die Erfahrungen bezüglich des Ablaufes von Energieumwandlungen finden:

- Alle Prozesse laufen von selbst immer in Richtung eines Gleichgewichtszustandes ab.
- Für den Ablauf von Prozessen ist eine Triebkraft notwendig.
- Die Umwandelbarkeit von Energieformen ist eingeschränkt.
- Die Umgebung eines Energiewandlungsprozesses beeinflusst die Umwandelbarkeit.
- Bei jedem realen Prozess treten Irreversibilitäten auf.

Diese Erfahrungssätze sind auch in dem thermodynamischen Konzept der Exergie enthalten, wobei die Bezeichnung „Exergie“ im Jahr 1956 von RANT geprägt wurde [RAN56]. Das Exergiekonzept wurde von einer Vielzahl von Autoren weiter entwickelt. Stellvertretend für die bekanntesten Wissenschaftler auf diesem Gebiet stehen BAEHR [BAE88], BEJAN, TSATSARONIS, MORAN [BEJ96], FRATZSCHER [FRA86], GAGGIOLI [GAG80], SZARGUT [SZA88] und WALL [WAL86]. Das Exergiekonzept wurde in die thermodynamischen Lehrbücher aufgenommen [BEA86, BOS98, CEN02, ELS92, KHA97, LUC04] und dort ausführlich diskutiert.

Das Konzept wurde nicht nur theoretisch entwickelt; es existiert eine Vielzahl von Veröffentlichungen über verschiedene Anwendungen. Hierzu gehört die Betrachtung einzelner Technologien wie der Vinylchloridrocknung [HEB86] oder einer komplexen Düngemittelanlage [RAD95]. Auch über Fragen der Nutzung von Biomasse existieren exergetische Analysen für verschiedene technologische Verfahren [COT02, HEB05, MIN02, ROS02]. Darüber hinaus wurden Verfahren zur gekoppelten Erzeugung von Produkten, wie zum Beispiel die integrierte Elektroenergie- und Wasserstoffherzeugung [TSA05], untersucht und exergetische Analysen ganzer Wirtschaftsbereiche (wie beispielsweise der schwedischen Industrie [WAL88]) durchgeführt.

2.1.1 Definition

Die Grundlagen der Thermodynamik sind in den zwei Hauptsätzen zusammengefasst. Der Erste Hauptsatz (1. HS), der auch als Energieerhaltungssatz bezeichnet wird, definiert, dass die Energie eines Systems nur durch Energietransport über die Systemgrenzen verändert werden kann [BAE96]. Bei Stoff- und Energiewandlungsprozessen kann Energie von einer Energieform in eine andere übergehen, jedoch nicht vernichtet werden. Über die oben genannten Erfahrungen hinsichtlich der Richtung des freiwilligen Prozessablaufes oder über die Umwandelbarkeit gibt der 1. HS keine Auskunft.

Hier setzt der Zweite Hauptsatz an, der die Möglichkeiten der Umwandlung von Energie einschränkt. In der KELVIN-PLANCK-Formulierung lautet er: „It is impossible for any device that operates on a cycle to receive heat from a single reservoir and to produce a net amount of work“

[CEN02] und enthält die Forderung einer Wärmequelle und einer Wärmesenke für die Arbeitserzeugung und impliziert auch, dass Wärme nicht vollständig umgewandelt werden kann. Die Definition nach CLAUSIUS: „It is impossible to construct a device that operates in a cycle and produces no effect other than the transfer of heat from a lower-temperature body to a higher-temperature body“ [CEN02] zeigt, dass für die Umkehrung freiwillig ablaufender Prozesse ein zusätzlicher Aufwand erforderlich ist, um einen derartigen Prozess zu realisieren.

Aus den Definitionen folgt die qualitative Einordnung von Energieformen. Es lassen sich drei Klassen im Hinblick auf die Umwandelbarkeit bilden:

- unbegrenzt umwandelbare Energie (Beispiel: Arbeit),
- begrenzt umwandelbare (Beispiel: Wärme) und
- nicht umwandelbare Energien (Umgebungsenergie) [FRA86, YAN94].

Da nur der wandlungsfähige Anteil einer Energie für den Menschen von Nutzen ist, lässt sich hierdurch ihre Qualität bestimmen. Die Zustandsgröße Exergie verbindet die Aussagen der beiden Hauptsätze der Thermodynamik und ist folglich ein Maß für die Qualität von Energie.

Damit lässt sich die Exergie wie folgt definieren: „Exergie ist der unbeschränkt umwandelbare Teil der Energie, der aus einer beliebigen Energieform bei reversibler Wechselwirkung mit der Umgebung gewinnbar ist“ [FRA86]. Die explizite Erwähnung des zu erreichenden Gleichgewichtszustandes führt zu folgender Formulierung: „Exergy is the quantity of work which can be extracted by an external energy consumer during a reversible interaction between a system and its surroundings until complete equilibrium is reached“ [BRO94]. Diese Definitionen lassen auch eine umgekehrte Sichtweise auf den Prozess zu. Indem man vom Gleichgewichtszustand ausgeht, erhält man als Definition: „Exergie ist die minimale Arbeit, die erforderlich ist, um ein System mit bestimmten thermodynamischen Parametern aus einer Umgebung heraus zu erzeugen“ [FRA86].

Der Anteil an Energie, der nicht in Exergie umgewandelt werden kann, wird als Anergie bezeichnet [BAE96], so dass sich die Energie aus den zwei Anteilen Exergie und Anergie zusammensetzt:

$$E_n = E + A. \tag{2.1}$$

Es ist offensichtlich, dass Arbeit ausschließlich Exergie enthält, während die Umgebungsenergie als reine Anergie aufzufassen ist. Es existiert jedoch die Möglichkeit, dass die Exergie von Energieträgern (wie beispielsweise Ethen) aufgrund ihres chemischen Potentials größer als die Energie sein kann. Diese Exergie kann dann nur unter Aufnahme von zusätzlicher Anergie aus der Umgebung gewonnen werden [BIT01].

Es zeigen sich damit weitgehende Differenzen zwischen den Zustandsgrößen Energie und Exergie, die zusammengefasst in nachstehender Tabelle gegenübergestellt sind [DIN01, WAL87].

Tabelle 2.1: Vergleich Energie-Exergie

	Energie	Exergie
Grundlage	1. Hauptsatz der Thermodynamik	Hauptsätze der Thermodynamik
Maxime	„Nichts verschwindet.“	„Alles dissipiert.“
Definition	Energie ist geordnete und ungeordnete Bewegung oder die Fähigkeit, Bewegung zu erzeugen.	Exergie ist Arbeit oder die Fähigkeit, Arbeit zu erzeugen. Exergie gibt die Qualität der Energie an.
Eigenschaft	Quantitätsmaßzahl	Qualitätsmaßzahl

2.1.2 Umgebungszustand

Die Definition der Zustandsgröße Exergie enthält den Bezug auf den Umgebungszustand des betrachteten Systems, was in der Fachliteratur intensiv diskutiert wurde [ALE88a, ALE88b, BAE88, FRA86]. Der Umgebungsbezug ist als Vorteil der Methode anzusehen, da die Energie-wandlungsprozesse im System nicht als losgelöst von der Systemumgebung betrachtet werden können. Bei der Festlegung dieses Referenzzustandes müssen einige Anforderungen, die sich aus der Exergiedefinition ergeben, berücksichtigt werden.

Der Umgebungszustand ist als konstant anzunehmen, d. h. er darf durch die Wechselwirkungen zwischen System und Systemumgebung nicht verändert werden: “Environment parameter remain unchanged during interaction with the system” [BRO94]. Folglich muss die Umgebung als groß gegenüber dem betrachteten technischen System angenommen werden, damit Zustandsänderungen im System keine Auswirkungen auf die Zustandsgrößen der Umgebung haben [FRA86].

Da die Exergie als maximal gewinnbare Arbeit charakterisiert wurde, folgt, dass sich die Umgebung selbst im thermodynamischen Gleichgewicht befinden muss, um die Forderung nach einem exergetischen Referenzzustand zu erfüllen [SZA88]. Es zeigt sich jedoch, dass die natürliche Umgebung technischer Systeme im thermodynamischen Sinne nicht im Gleichgewicht vorliegt, wie schon die Druck- und Temperaturgradienten der Atmosphäre belegen. Diese Problematik wurde besonders hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung von Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre in der Literatur umfangreich diskutiert und entsprechende Referenzumgebungen vorgeschlagen

[FRA86, GOL98, SZA88, VAL02a, WEP80, ZHE02]. Zusätzlich wurde betrachtet, welche Zusammensetzung der Umgebungszustand bei Annahme eines thermodynamischen Gleichgewichts in Abhängigkeit von den berücksichtigten Schichtdicken der Erdkruste hat [AHR77]. Es zeigte sich, dass diese Zusammensetzung wesentlich von der Zusammensetzung der natürlichen Umgebung, die den vorgegebenen Bezugszustand technischer Systeme bildet, abweicht. Folglich wird im Weiteren von einer Systemumgebung ausgegangen, die durch gehemmte Gleichgewichte charakterisierbar ist. Zudem sind in den meisten Fällen der Stoff- und Energiewandlung nur wenige stoffliche Komponenten zu betrachten, so dass ein Umweltmodell mit ausgewählten Bezugssubstanzen gerechtfertigt ist [SZA88]. Auch die Auswirkungen der Variation der Umgebungstemperatur auf die Ergebnisse der exergetischen Analyse wurden untersucht [RIV02b].

Für die meisten Analysen im Bereich der Energietechnik genügt es, die Umgebungstemperatur und den Umgebungsdruck festzulegen und ein einfaches Umgebungsmodell zu verwenden. Unter Berücksichtigung der gegebenen natürlichen Bedingungen wurde die Umgebungstemperatur T_U mit 293,15K gewählt und als Umgebungsdruck p_U der Standarddruck $p_0 = 101,325 \text{ kPa}$ verwendet. Die stoffliche Umgebung lässt sich in Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre gliedern und wurde in Anlehnung an ähnliche exergetische Analysen [FRA86, MUN91] gebildet. Die Atmosphäre wird ausgehend von der Zusammensetzung der trockenen Luft als gesättigte feuchte Luft bei T_U und p_U modelliert, wobei die Edelgasanteile der Stickstoffkomponente zugeordnet wurden.

Tabelle 2.2: Zusammensetzung der Umgebungsluft

Komponente	Massenanteile ξ_{tL} der trockenen Luft	Massenanteile ξ_{LU} der Umgebungsluft
Stickstoff N_2	0,7667	0,7556
Sauerstoff O_2	0,2328	0,2295
Kohlendioxid CO_2	0,0005	0,0005
Wasser H_2O	0	0,0145

Die Hydrosphäre wird allein durch flüssiges Wasser abgebildet. Durch die Annahme gesättigter feuchter Luft befindet sich die Hydrosphäre mit der Atmosphäre im thermodynamischen Gleichgewicht. Zusätzlich werden die benötigten Komponenten der Lithosphäre als reine exergielose Bezugssubstanzen berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass diese Substanzen nicht in einer

einzigsten Phase, sondern – aufgrund ihrer schlechten Vermischbarkeit in Relation zur Atmosphäre – in parallel existierenden Phasen vorliegen. Als Bestandteile der festen Phasen wurden Calciumcarbonat (CaCO_3), Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und Eisen(III)-oxid (Fe_2O_3) verwendet, wobei bei dieser Modellierungsvariante die Aufnahme zusätzlicher Bezugssubstanzen in der festen Phase möglich ist.

2.1.3 Berechnungsgleichungen

Nach der Festlegung des Referenzzustandes können nun Berechnungsvorschriften für die Exergie angegeben werden [BEJ96, CEN02, FRA86, MUN91, PRI76]. Dabei wird zwischen der Exergie einer Stoffmenge und dem Exergiestrom eines Stoff- oder Energiestromes unterschieden.

Unter den oben angegebenen Bedingungen für den Umgebungszustand erhält man für die spezifische Exergie einer Stoffmenge, die durch einen reversiblen Prozess gewinnbar ist, die Formulierung:

$$e = (u - u_U) + T_U(s - s_U) + p_U(v - v_U), \quad (2.2)$$

die gleichzeitig das Minimum der inneren Energie bei den Umgebungsbedingungen darstellt.

Da aber im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit stationäre Prozesse stehen, werden im Weiteren nur Exergieströme betrachtet und eine Akkumulation oder Speicherung von Stoff- und Energieströmen im System ausgeschlossen. Daher sind nachfolgend alle Begriffe und Formelzeichen als Stromgrößen aufzufassen.

Ausgehend von den zwei Hauptsätzen der Thermodynamik lässt sich eine Berechnungsgleichung für die Exergie eines Stoffstromes für stationäre Fließprozesse entwickeln [BAE96, FRA86, GAG80, ELS92]. Die nachfolgende Herleitung verdeutlicht, wie die beiden Hauptsätze im Exergiekonzept verbunden werden. Die Energiebilanz nach dem 1. HS (Gleichung (2.3)) und die Entropiebilanz (2. HS, Gleichung (2.4)) haben für stationäre, durchströmte Prozesse vom Zustandspunkt 1 zum Zustandspunkt 2 unter der Vernachlässigung von potentieller, kinetischer Energie folgende Form:

$$\int_1^2 dq + w_{t,12} = h_2 - h_1, \quad (2.3)$$

beziehungsweise:

$$\int_1^2 \frac{dq}{T} = s_2 - s_1 - \Delta s_{irr}. \quad (2.4)$$

Durch die Multiplikation der Entropiebilanz mit der Umgebungstemperatur T_U und Einsetzen in die Energiebilanz erhält man die Verknüpfung der beiden Hauptsätze, die als Bilanzgleichung der Exergie bezeichnet wird:

$$\int_1^2 \frac{T - T_U}{T} dq + w_{t,12} = h_2 - h_1 - T_U(s_2 - s_1) + T_U \Delta s_{irr}. \quad (2.5)$$

Aus der Definition der Exergie als maximale Arbeitsfähigkeit des Systems bezogen auf den Umgebungszustand resultieren die Bedingungen

- reversibler Prozessablauf,
- Wärmeaustausch mit der Umgebung bei Umgebungstemperatur und
- Umgebungsbezug.

Damit ergibt sich aus Gleichung (2.5) für die maximal vom System leistbare Arbeit

$$-w_t = e = h - h_U - T_U(s - s_U) \quad (2.6)$$

und damit die Definitionsgleichung für die spezifische Exergie eines Stoffstroms.

2.1.4 Exergieanteile

Neben der grundlegenden Definitionsgleichung sind im Zuge einer exergetischen Analyse je nach Untersuchungsobjekt noch weitere Exergieanteile zu berücksichtigen. Hierzu lassen sich stofffreie Exergie und stoffstromgebundene Exergie unterscheiden. Als stofffreie Exergieformen werden die Prozessgrößen Arbeit und Wärme bezeichnet. Während die Arbeit als geordnete Bewegung entropiefrei ist und somit reine Exergie darstellt

$$\dot{E}^W = \dot{W}, \quad (2.7)$$

ist die Exergie der Wärme vom Temperaturniveau abhängig [FRA86, BRO94]:

$$\dot{E}^Q = \frac{T - T_U}{T} \dot{Q}. \quad (2.8)$$

Der Carnot-Faktor η_C bestimmt den Anteil des Wärmestromes, der mit Hilfe eines reversiblen Kreisprozesses in einen Arbeitsstrom umgewandelt werden kann und eignet sich als Qualitätsmaßstab. Es zeigt sich, dass Wärme unendlich hoher Temperatur als reine Exergie betrachtet werden kann. In ähnlicher Weise erfordert der Entzug eines Wärmestromes unterhalb der Umgebungstemperatur, d.h. die Kältebereitstellung, einen Arbeitsaufwand, um den Wärmestrom auf das Umgebungsniveau zu heben, so dass auch hier ein positiver Carnot-Faktor erscheint.

Die stoffstromgebundene Exergie setzt sich im Wesentlichen aus potentieller, kinetischer, physikalischer und chemischer Exergie des Stoffstromes zusammen [TSA93]:

$$\dot{E}^S = \dot{E}^{PH} + \dot{E}^{CH} + \dot{E}^{POT} + \dot{E}^{KIN}, \quad (2.9)$$

die durch Eliminierung des Massestroms die entsprechenden spezifischen Größen ergeben:

$$e^S = e^{PH} + e^{CH} + e^{POT} + e^{KIN}. \quad (2.10)$$

Zusätzlich zu diesen Exergieanteilen können noch andere Exergieanteile, wie z.B. die Exergie von magnetischen oder elektrischen Kraftfeldern oder die Exergie der Oberflächenspannung, auftreten, die im Folgenden jedoch nicht weiter berücksichtigt werden, da sie für die Prozesse der Stoff- und Energiewandlung von untergeordneter Bedeutung sind.

Die spezifische physikalische Exergie e^{PH} gibt die Arbeit an, die man gewinnen kann, wenn man einen Stoffstrom von seinem definierten Temperatur-, Druck- und Konzentrationsniveau in die entsprechenden Umgebungsparameter überführt. Demzufolge ist es möglich, die physikalische Exergie in einen thermischen e^{TH} , mechanischen e^{ME} und Konzentrationsanteil e^{CO} zu zerlegen. Beispielsweise gibt der Konzentrationsanteil der Exergie an, wieviel Arbeit reversibel aufzuwenden ist, um eine Differenz der Konzentration eines Stoffstroms gegenüber der Umgebungskonzentration zu erzeugen.

Falls der betrachtete Stoffstrom eine andere Zusammensetzung als die definierte Umgebung hat und Stoffe enthält, die in der Systemumgebung nicht enthalten sind, so sind chemische Reaktionen zur Umwandlung des Stoffstromes in Umgebungsstoffe erforderlich. Folglich lässt sich ein spezifischer chemischer Exergieanteil e^{CH} formulieren, der die Exergie der chemischen Reaktion, die Konzentrationsexergie zur Aufkonzentrierung der Stoffstromanteile und der notwendigen Reaktionspartner für den Umsatz zu Umgebungsstoffen sowie die Konzentrationsexergie der Mischung dieser Reaktionsprodukte im Vergleich zur Umgebung umfasst [ATK01, FRA86, NAE88, ROD80, SZA88].

Die spezifische potentielle Exergie entspricht der spezifischen potentiellen Energie

$$e^{POT} = g(z - z_U), \quad (2.11)$$

wobei das Bezugsniveau z_U festgelegt werden muss. Der Anteil der potentiellen Exergie bei Energiewandlungsanlagen ist meist klein gegenüber der physikalischen Exergie [RAD95], Ausnahmen bilden beispielsweise Pumpspeicherkraftwerke, die aber im Folgenden nicht betrachtet werden sollen. Daher wird der potentielle Exergieanteil vernachlässigt. Ähnliches gilt für die spezifische kinetische Exergie:

$$e^{KIN} = \frac{v^2}{2}, \quad (2.12)$$

da die Strömungsgeschwindigkeiten in den betrachteten Anlagen klein sind und im Verhältnis zu den darin ablaufenden Energieumwandlungen unbedeutend sind.

Die definierten Exergieanteile und insbesondere die weitere Untergliederung der physikalischen Exergie erlauben der exergetischen Analyse, die Einflüsse auf die Effizienz der Energiewandlung genauer zu separieren. Sie bilden zugleich die Grundlage für das Konzept der exergetischen Transitbereinigung.

2.2 Exergiebilanz

Mit den vorgestellten Berechnungsgleichungen können nun Exergiebilanzen für die Bilanzräume eines Systems formuliert werden. Hinsichtlich der Vorgehensweise lassen sich die Input-Output-Bilanz, die Aufwand-Nutzen-Bilanz und die transitbereinigte Exergiebilanz unterscheiden. Die Notwendigkeit der Bilanzierung ergibt sich aus den Exergieverlusten, die in jedem Bilanzraum bei irreversiblen Prozessen auftreten und genauer analysiert werden sollen.

2.2.1 Reversibilität und Irreversibilität

In der Thermodynamik werden reversible und irreversible Prozesse unterschieden. Ein reversibler Prozessverlauf ist verlustfrei und umkehrbar. Das Konstrukt des reversiblen Prozesses ist eine Idealisierung, da alle realen Prozesse durch den Abbau von Triebkraftdifferenzen angetrieben werden. Alle real auftretenden Prozesse sind somit den irreversiblen Prozessen zuzuordnen, da hier beispielsweise durch Reibungseffekte und das Auftreten von Temperaturdifferenzen eine Umkehrbarkeit ohne Änderungen in der Systemumgebung zu hinterlassen nicht möglich ist.

Aus der Tatsache, dass bei den realen Prozessen eine Entropieproduktion stattfindet, folgt, dass die Exergie bei diesen Prozessen abnimmt. Daher ist die Exergie – anders als die Energie – keine Erhaltungsgröße. Folglich muss in jeder Exergiebilanz ein Verlustterm den irreversiblen Abbau von Exergie charakterisieren.

2.2.2 Input-Output-Bilanz

Die einfachste Variante der exergetischen Bilanzierung ist die Input-Output-Betrachtung, wie sie schematisch in Abbildung 2.1 dargestellt ist.



Abbildung 2.1: Exergiebilanz bei Input-Output-Betrachtung

In den betrachteten Bilanzraum treten Exergieströme \dot{E}_{IN} ein, die in diesem teilweise umgewandelt werden und abzüglich des auftretenden Exergieverlustes \dot{E}_D als austretende Ströme \dot{E}_{OUT} wieder erscheinen. Damit erhält man die nachstehende Bilanzgleichung [FRA86, VAL02b]:

$$\dot{E}_{IN} = \dot{E}_{OUT} + \dot{E}_D. \quad (2.13)$$

Der Exergieverlust dokumentiert die im Bilanzraum auftretende Dissipation (Abwertung der Energie), d. h. der Entropiezunahme aufgrund von Nichtumkehrbarkeiten im Prozess. Somit sind die inneren Exergieverluste die einzige Information über den Prozess bei dieser Bilanzierungsweise.

Vorteilhaft ist diese einfach zu erstellende Bilanz anzuwenden, wenn lediglich die Dissipation im Bilanzraum von Interesse ist oder lineare Input-Output-Rechnungen durchzuführen sind. Aus der Bilanz selbst sind jedoch keine Aussagen über die Umwandelbarkeit der eintretenden Exergieströme und die Nutzung der austretenden Exergien ableitbar.

2.2.3 Aufwand-Nutzen-Bilanz

Weitergehende Aussagen über den Prozess lassen sich durch die Unterscheidung der austretenden Exergieströme in erwünschte und unerwünschte Exergien erzielen. Allerdings bedingt diese Unter-

scheidung bereits den Übergang von einer rein thermodynamischen Betrachtungsweise zu einer von ökonomischen Nutzenkalkülen beeinflusst. Prinzipiell ist jeder aus einem Bilanzraum austretende Exergiestrom nutzbar, jedoch wird die Nutzung aufgrund ökonomischer Überlegungen eingeschränkt.

Die aus dem Bilanzraum austretenden Exergieströme werden hinsichtlich des Grades ihrer Erwünschtheit in Hauptprodukte, Nebenprodukte und Abprodukte [OEN97] unterschieden. Haupt- und Nebenprodukte des Prozesses werden hier als nutzbare Exergieströme \dot{E}_U gewertet. Die Exergie der Abprodukte \dot{E}_L hingegen wird als Verlust des Umwandlungsprozesses eingeordnet, wie Abbildung 2.2 illustriert.

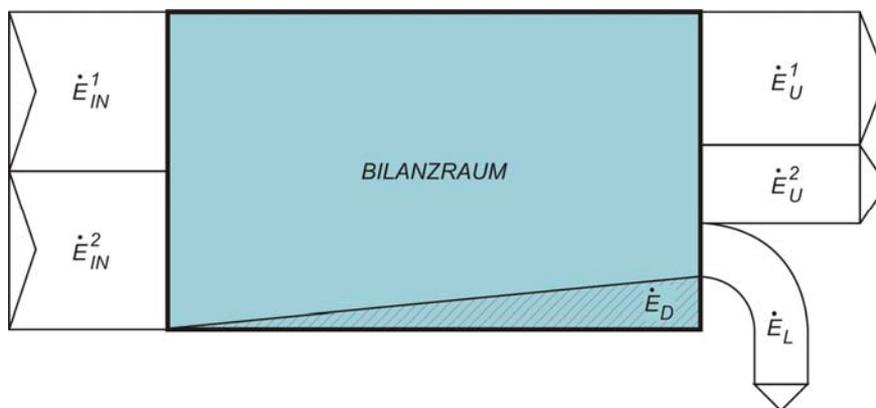


Abbildung 2.2: Exergiebilanz bei Nutzendefinition

Damit erhält man zwei Verlustterme in der Exergiebilanz:

$$\dot{E}_{IN} = \dot{E}_U + \dot{E}_L + \dot{E}_D. \quad (2.14)$$

Neben den Verlusten durch Irreversibilitäten \dot{E}_D , die auch als interne Exergieverluste bezeichnet werden, werden so auch äußere Exergieverluste \dot{E}_L durch ungenutzte Exergieabfuhr an die Umgebung berücksichtigt [DIN01]. Ein typisches Beispiel für die Abgabe von Exergie im Sinne äußerer Verluste ist die Emission von Abwärme an die Umgebung, die noch eine Exergie enthält, aber nicht genutzt wird.

Diese Bilanzierungsform hat Vorteile gegenüber der Input-Output-Bilanz, da die Verwendung der umgewandelten Ströme berücksichtigt wird, was besonders bei gekoppelten Produktionen, wozu die meisten Prozesse der Energie- und Stoffwandlung zu zählen sind, notwendig ist. Die Variante verlässt jedoch bereits den Bereich der reinen Thermodynamik mit der subjektiv beeinflussten Definition von Hauptprodukten, Nebenprodukten und Abprodukten. Die Umwandelbarkeit der eintretenden Exergieströme im Bilanzraum wird dabei nicht berücksichtigt, wodurch die Ursachen der auftretenden Exergieverluste verdeckt werden.

2.3 Transitbereinigung

Die Einschätzung der Umwandelbarkeit von in den Bilanzraum eintretenden Exergieströmen ist für eine detaillierte Analyse von Prozessen notwendig. Beispielsweise scheinen die Exergieverluste durch Dissipation eines Erdgasverdichters im Verhältnis zur eingesetzten Exergie wesentlich weniger bedeutsam zu sein, als die gleich großen Verluste eines baugleichen Verdichters, der den Umgebungsstoff Luft auf ein höheres Druckniveau transformiert. Im erstgenannten Fall sorgt die große stoffliche Exergie des Erdgases dafür, dass der Anteil der Exergieverluste in der Bilanz als verhältnismäßig gering erscheint. Um diesen Mangel abzustellen ist die Anwendung des Konzeptes der exergetischen Transitbereinigung erforderlich, das im Folgenden diskutiert wird.

2.3.1 Definition und Bedeutung

Die in einen Bilanzraum eintretende Exergie E_{IN} steht meist nicht im vollen Umfang zur Umwandlung zur Verfügung. Die Ursachen dafür liegen im Design des betrachteten Bilanzraumes. Beispielsweise ist in einem einfachen Wärmeübertrager eine Umwandlung des chemischen Exergieanteils der beteiligten Stoffe nicht möglich. Um nun den umwandelbaren Teil der eintretenden Exergieströme in den Bilanzraum zu separieren, kann man einen disponiblen Anteil, der für die Prozessführung aufgewandt wird, und einen Transitanteil unterscheiden [FRA86, HEB86, HEB04, SOR93, SOR94, SOR98]:

$$\dot{E}_{IN} = \dot{E}_F + \dot{E}_T. \quad (2.15)$$

Der Exergietransit E_T wird gedanklich um den Bilanzraum herumgeführt. Dadurch wird der betrachtete Bilanzraum von nicht umwandelbaren Exergieströmen bereinigt, denn nur der disponible Teil der Exergie, der im Folgenden als Feedexergiestrom E_F bezeichnet wird, tritt im Bilanzraum in Erscheinung. Durch die Einführung eines Exergietransits, der nur zwischen einem eintretenden Exergiestrom und einem Produktexergiestrom des Bilanzraumes definiert werden kann, verändert sich auch die Definition des Nutzens des betrachteten Prozesses. Der gesamte Nutzen des Prozesses E_U setzt sich demnach aus dem transitbereinigten Nutzen, der Produktexergie E_p , und der um den Bilanzraum geführten Transitexergie zusammen:

$$\dot{E}_U = \dot{E}_P + \dot{E}_T. \quad (2.16)$$

Das Einsetzen der Gleichungen (2.15) und (2.16) in die Aufwand-Nutzen-Bilanz (Gleichung (2.14)) führt zur transitbereinigten Exergiebilanz:

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_L + \dot{E}_D. \quad (2.17)$$

Diese Bilanzierungsmethode definiert damit einen transitbereinigten Bilanzraum innerhalb des oben beschriebenen Aufwand-Nutzen-Bilanzraums. Abbildung 2.3 zeigt diese Vorgehensweise schematisch.

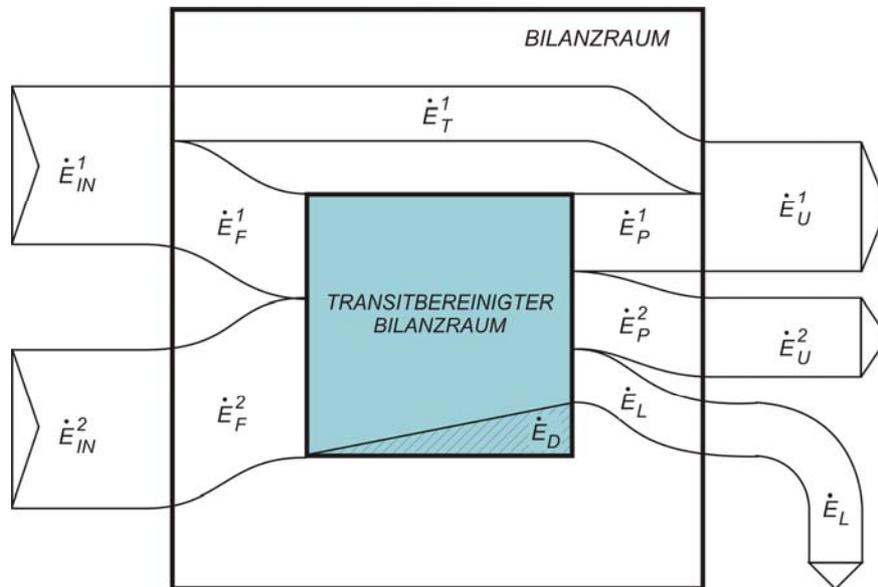


Abbildung 2.3: Exergiebilanz bei exergetischer Transitbereinigung

Die Verwendung der Transitbereinigung gestattet eine detaillierte Betrachtung von Umwandlungsprozessen in einem Bilanzraum, da nicht wandelbare Exergieströme ausgeschlossen werden. Die Bilanz enthält nur den im Prozess umwandelbaren Exergieanteil und unterscheidet Produkte und Abprodukte. Nachteilig ist neben dem erhöhten Aufwand für die Bestimmung der Feedexergie vor allem die Gefahr der Subjektivität bei der Definition des Exergietransits zu sehen.

2.3.2 Möglichkeiten der Transitbereinigung

Die genaue Bestimmung des wandelbaren Teils der Exergie, der Feed-Exergie E_F , ist in der Fachliteratur nicht eindeutig beschrieben. Die Auswertung der Literatur zeigt, dass selbst der Begriff der Transitexergie nicht exakt definiert ist. Unter Transitexergie verstehen FRATZSCHER u.a. einen „... Exergiestrom, der an der Umwandlung der Aufwandströme in die Nutzenströme nicht unmittelbar beteiligt ist und de facto konstant durch das System fließt“ [FRA86]. Eine weitere Definitionsmöglichkeit bieten SORIN u.a. an: „Transit ... is the fraction of exergy which remains constant from the inlet to the outlet of a system“ [SOR93, SOR98].

Beide Transitdefinitionen bieten Interpretationsspielräume, da die Formulierungen wenig konkret abgefasst sind, wie beispielsweise durch „nicht unmittelbar“ bzw. „de facto konstant“ deutlich wird.

Deshalb stellt sich die Frage, wie der Exergietransit zu bestimmen ist. Durch die gegebenen Freiheitsgrade bei der Definition bieten sich drei denkbare Varianten der Transitbereinigung an. Es lässt sich

- die anteilsorientierte,
- die wandlungsorientierte und
- die potentialorientierte Variante der Transitbereinigung unterscheiden.

Alle drei Varianten haben ihre Berechtigung, weisen jedoch auch diverse Vor- und Nachteile auf, wie nachfolgend gezeigt wird. Die Wahl der Transitvariante stellt einen subjektiven Einfluss auf die Analyse und Bewertung dar.

2.3.2.1 Anteilsorientierter Transit

Bei der Anwendung der anteilsorientierten Transitbereinigung bilden die oben eingeführten Exergieanteile die Ausgangsbasis, so dass zunächst die Exergieanteile aller eintretenden und austretenden Exergieströmen bestimmt werden müssen. Der Transit umfasst dann alle die Exergieanteile, die im betrachteten Bilanzraum keiner Wandlung unterworfen sind und daher konstant den Bilanzraum durchströmen [HEB86, HEB90].

Die Vorgehensweise soll anhand eines einfachen Wärmeübertragungsprozesses erläutert werden. In dem in Abbildung 2.4 skizzierten Bilanzraum um einen Wärmeübertrager strömen das heiße Medium E_1 und das kalte Medium E_3 ein. Im Gegenstromprinzip findet der Wärmetransfer vom heißen zum kalten Medium statt, wobei Druckverluste in den Medien auftreten. Durch diesen Prozess werden der thermische und auch der mechanische Exergieanteil beider Ströme beeinflusst. Der chemische und der Konzentrationsanteil der eintretenden Exergieströme sind vom Prozess unbeeinflusst und finden sich in gleicher Größe am Ausgang des Bilanzraumes wieder, wenn keine chemischen Reaktionen auftreten und nur einphasige Medien im Wärmeübertrager sich befinden. Folglich sind in diesem Fall der chemische und der Konzentrationsanteil der eintretenden Exergien als anteilsorientierter Transit aufzufassen, während der thermische und mechanische Exergieanteil zumindest teilweise umgewandelt werden.



Abbildung 2.4: Bilanzraum um einen Wärmeübertrager

Damit ermöglicht diese Variante eine relativ einfache Bestimmung des Exergietransits über die Analyse der Exergieanteile und erlaubt eine differenzierte Bilanzierung als im Fall ohne Transitbereinigung. Nicht berücksichtigt werden bei dieser Methode anteilsspezifische Transite, d. h. dass die Exergieanteile der Feedexergieströme möglicherweise nicht vollständig zur Umwandlung zur Verfügung stehen.

2.3.2.2 Wandlungsorientierter Transit

Diese anteilsspezifischen Transite werden bei Anwendung der wandlungsorientierten Transitbereinigung berücksichtigt. Bei dieser Vorgehensweise wird die gesamte Exergie, die durch ein Systemelement strömt und nicht umgewandelt wird, als Transit angesehen. Die Bestimmung des Transits orientiert sich an der Definition von SORIN u.a. [SOR93, SOR94, SOR99], nach der der Transit anhand der Zustandsgrößen der über die Bilanzgrenzen strömenden Stoff- und Energieströme bestimmt wird. Dies bedeutet, dass für jeden Exergiestrom jeweils das Minimum seiner Exergieanteile am Eintritt oder Austritt gesucht wird. Dazu werden die den Exergieanteil bestimmenden Zustandsgrößen (Temperatur, Druck, Konzentration, chemisches Potential) am Eintritt und Austritt verglichen. Das Minimum eines jeden Exergieanteils wird zum wandlungsorientierten Transit eines Exergiestromes zusammengefasst. Durch die Definition über das Minimum der Zustandsgrößen an den Bilanzgrenzen kann diese Methode auch als bilanzorientierte Transitbereinigung bezeichnet werden.

Im Fallbeispiel des Wärmeübertragers bedeutet das für das heiße Medium, dass neben der chemischen Exergie und der Konzentrationsexergie, die konstant durch den Bilanzraum strömen und daher in vollem Umfang zum Exergietransit zählen, zusätzlich noch die thermische und mechanische Exergie am Austritt des heißen Mediums dem Exergietransit zugerechnet werden, da die Temperatur wie auch der Druck des heißen Mediums am Austritt aus dem Bilanzkreis geringer als

am Eintritt sind. Der Transit des kalten Mediums umfasst neben der konstant bleibenden chemischen und der Konzentrationsexergie auch noch den thermischen Exergieanteil am Eintritt und den mechanischen Exergieanteil am Austritt aus dem Bilanzraum.

Somit werden bei der wandlungsorientierten Transitbereinigung auch anteilsspezifische Transitexergien erfasst und letztlich nur umgewandelte Exergie zur Feedexergie zugeordnet. Problematisch bei dieser Transitdefinition aus der Exergiebilanz heraus ist der Einfluss der Effektivität der Stoff- und Energiewandlung im betrachteten Element auf die Größe des Transits. Dies führt zu dem Effekt, dass je weniger Exergie im Bilanzraum umgewandelt wird, d. h. je weniger das Umwandlungspotential genutzt wird, desto mehr Exergie wird als Transitexergie ausgewiesen. Auf das Beispiel des Wärmeübertragers angewandt bedeutet dies, dass im Rahmen der Hauptsätze zur Verfügung stehende, aber nicht zur Wärmeübertragung genutzte thermische Exergie des heißen Mediums als Teil der Transitexergie aufgefasst wird, obwohl dieser Teil umgewandelt werden könnte. Letztlich wird bei dieser Variante die Ausnutzung des zur Umwandlung zur Verfügung stehenden Potentials an Exergie nicht berücksichtigt.

2.3.2.3 Potentialorientierter Transit

Mit der dritten Variante der Transitbereinigung soll der Nachteil durch die Abhängigkeit des Exergietransits von der Ausnutzung des Umwandlungspotentials vermieden werden. Bei der potentialorientierten Transitbereinigung wird nur die Exergie als Transit betrachtet, die im Systemelement aufgrund seiner thermodynamischen Parameter nicht umgewandelt werden kann. Dazu müssen alle Exergieanteile der eintretenden Ströme auf ihre Umwandelbarkeit im Bilanzraum untersucht werden. Dem Exergietransit werden sofort alle Exergieanteile zugeordnet, die keiner Umwandlung innerhalb des Bilanzkreises unterliegen. Für alle anderen Exergieanteile ist eine Berechnung des maximal möglichen Wandlungspotentials zur Bestimmung des Exergietransits notwendig. Der zusätzliche Aufwand scheint gerechtfertigt, da durch die Orientierung an dem unter den gegebenen technologischen Randbedingungen bestmöglichen Prozess eine präzisere Analyse der Gründe für exergetische Verluste und deren Zuordnung ermöglicht wird. Zur Bestimmung des potentialorientierten Transits bedarf es daher der Berechnung eines weiteren Zustandspunktes, der den maximal erreichbaren Zustand bei vorständiger Ausnutzung des Potentials der Energiewandlung im Bilanzraum markiert [ATK01, CHA03]. Somit existiert neben dem Ideal des reversiblen Prozesses noch ein weiterer idealisierter Prozess, der unter Berücksichtigung der gegebenen thermodynamischen Zustandsgrößen an den Bilanzraumgrenzen die unter diesen Bedingungen bestmögliche Prozessführung mit minimalen Irreversibilitäten beschreibt.

Die Berechnung dieses Zustandspunktes und die Bestimmung des potentialorientierten Transits soll wiederum am Beispiel des einfachen Wärmeübertragungsprozesses im Gegenstrom skizziert werden. Die Analyse der einzelnen Exergieanteile der Stoffströme ergab, dass sowohl der chemische wie auch der Konzentrationsanteil in diesem Prozess keiner Veränderung unterliegen. Der thermische Exergieanteil der eintretenden Ströme wird durch die Wärmeübertragung beeinflusst. Folglich muss das maximal mögliche Wandlungspotential bestimmt werden, wozu der kalte und der heiße Strom getrennt voneinander betrachtet werden. Da die thermische Exergie des eintretenden kalten Stromes vergrößert werden soll und damit der Austrittszustand durch eine höhere Temperatur gekennzeichnet ist, steht diese Exergie nicht zur Umwandlung zur Verfügung und wird als Exergietransit gedanklich am Element vorbeigeführt. Die thermische Exergie des heißen Stromes hingegen steht teilweise zur Umwandlung zur Verfügung, wobei der thermodynamische Zustand nach der Ausnutzung des maximal möglichen Wandlungspotentials von Interesse ist. Bei jedem Gegenstrom-Wärmeübertrager mit gleichen Wasserwerten (Massenstrom multipliziert mit der spezifischen Wärmekapazität) der zwei Medien ist ein nahezu reversibler Prozess denkbar, der sich durch eine stets infinitesimal kleine Temperaturdifferenz zwischen den zwei Medien und damit notwendigerweise durch eine unendlich große Wärmeübertragungsfläche auszeichnet. In der Realität sind meist Wärmeübertragungsaufgaben zwischen Medien mit unterschiedlich großen Wasserwerten zu realisieren. Für den Fall, dass der Wasserwert des kalten Mediums kleiner ist als der des heißen wird im Folgenden eine Grenzaustrittstemperatur für den heißen Stoffstrom bestimmt, die das maximale Wandlungspotential dieser Wärmeübertragungsaufgabe beschreibt.

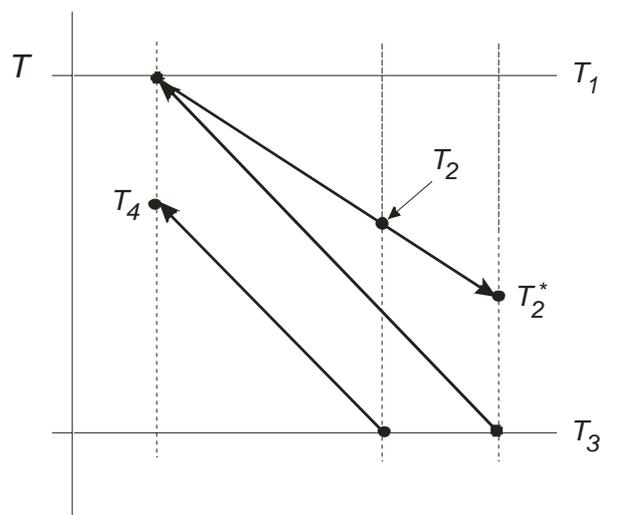


Abbildung 2.5: Temperaturverlauf bei der Gegenstrom-Wärmeübertragung

Wie der Temperaturverlauf in Abbildung 2.5 zeigt, ließe sich die Exergie des heißen Mediums maximal bis zur Austrittstemperatur T_2^* nutzen. Gleichzeitig könnte sich der kalte Strom aufgrund des kleineren Wasserwertes nicht nur bis T_4 , sondern bis zur Temperatur T_1 aufheizen, wobei an

dieser Stelle des Gegenstrom-Wärmeübertragers die Triebkraftdifferenz infinitesimal klein werden würde. In der Berechnungsgleichung für die Grenztemperatur sind diese Rahmenbedingungen berücksichtigt und man erhält [CHA03]:

$$T_2^* = T_1 - \frac{m_3 c_{p3}}{m_1 c_{p1}} (T_1 - T_3). \quad (2.18)$$

Mit der ermittelten Grenztemperatur für den Austritt des heißen Stromes lässt sich der Zustandspunkt, der sich bei maximaler Ausnutzung des exergetischen Wandlungspotentials einstellt, errechnen. Die thermische Exergie des heißen Stroms in diesem Zustandspunkt kann nicht weiter für die Wärmeübertragung genutzt werden und stellt daher den thermischen Exergietransit für den heißen Strom dar.

Bei der Bestimmung des thermischen Exergietransits ist darüber hinaus jedoch noch zu prüfen, ob die tatsächliche Austrittstemperatur des heißen Mediums über der ermittelten Grenztemperatur liegt oder ob beispielsweise Wärmeverluste über die Apparatewand bei mangelhafter Isolierung zu einer Unterschreitung der berechneten Grenztemperatur führen. In letzterem Fall muss auf die wandlungsorientierte Transitbereinigung zurückgegriffen werden und die reale Austrittstemperatur des heißen Mediums zur Transitberechnung verwendet werden.

Der mechanische Exergieanteil der Stoffströme wird durch auftretende Druckverluste beeinflusst. Dadurch ergeben sich geringere Drücke für den heißen und den kalten Strom am Austritt aus dem Apparat. Zur Umwandlung steht die ermittelte Druckdifferenz zwischen Eintritts- und Austrittszustand zur Verfügung, so dass der mechanische Exergietransit aus den Zustandsgrößen am Austritt zu ermitteln ist. Es zeigt sich, dass der mechanische Exergietransit aus Ermangelung an Grenzzuständen p_2^* und p_4^* mit der wandlungsorientierten Transitbereinigungsvariante bestimmt werden muss. Verallgemeinert lässt sich konstatieren, dass nur bei der Ermittlung eines Grenzzustandes die potentialorientierte Transitbereinigung anwendbar ist, anderenfalls muss auf die wandlungsorientierte Transitbereinigung zurückgegriffen werden.

Mit dieser Herangehensweise bestimmt sich der gesamte Exergietransit des Gegenstrom-Wärmeübertragers folgendermaßen:

$$\dot{E}_T = \dot{E}_1^{CH} + \dot{E}_3^{CH} + \dot{E}_1^{CO} + \dot{E}_3^{CO} + \dot{E}_2^{TH} + \dot{E}_3^{TH} + \dot{E}_2^{ME} + \dot{E}_4^{ME}, \quad (2.19)$$

der den erläuterten Grenzzustand 2* mit den Parametern T_2^* und p_2 berücksichtigt und von der beabsichtigten Arbeitsweise des Wärmeübertragers ausgeht. Dieser Transitbetrag umfasst alle

Exergieanteile, die nicht zu einer Umwandlung im Rahmen der Gegenstrom-Wärmeübertragung bei den gegebenen technologischen Parametern zur Verfügung stehen.

Mit der Definition des Exergietransits lässt sich die transitbereinigte Exergiebilanz für den betrachteten Gegenstrom-Wärmeübertrager aufstellen:

$$(\dot{E}_1^{TH} - \dot{E}_{2^*}^{TH}) + (\dot{E}_1^{ME} - \dot{E}_2^{ME}) + (\dot{E}_3^{ME} - \dot{E}_4^{ME}) = (\dot{E}_4^{TH} - \dot{E}_3^{TH}) + (\dot{E}_2^{TH} - \dot{E}_{2^*}^{TH}) + \dot{E}_D. \quad (2.20)$$

Die Bilanz verdeutlicht, dass zwei Exergietermine, nämlich die Erhöhung der thermischen Exergie des kalten Stromes und die thermische Exergie des heißen Stromes, die nicht zur Umwandlung im Wärmeübertrager genutzt wurde, den transitbereinigten Bilanzraum verlassen. Eindeutig ist die Erhöhung der thermischen Exergie ($E_4^{TH} - E_3^{TH}$) das Hauptprodukt des Wärmeübertragungsprozesses. Die nicht genutzte thermische Exergie ist im Hinblick auf die weitere Verwendung entweder als Nebenprodukt oder als Abprodukt einzuordnen.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der expliziten Berücksichtigung des Umwandlungspotentials eines Prozesses. Die Variante vermeidet dadurch die Nachteile der anteils- und der wandlungsorientierten Transitbereinigung. Jedoch erfordert die Methode die Bestimmung eines zusätzlichen Zustandspunkts als Grenzzustand unter Berücksichtigung weiterer Annahmen, was die Subjektivität der Transitbereinigung erhöht.

2.3.3 Definition des Feedfaktors

Nach der Bestimmung des Exergietransits ist das Verhältnis von Feedexergie und Transitexergie festgelegt. Es lässt sich eine Kennzahl definieren, die die im Prozess disponible Exergie ins Verhältnis zur eintretenden Exergie in den Bilanzraum setzt. Dieses Verhältnis wird als Feedfaktor bezeichnet:

$$\varphi = \frac{\dot{E}_F}{\dot{E}_{IN}}. \quad (2.21)$$

Die Kennzahl, die einen Wertebereich von 0 bis 1 aufweist, gibt Auskunft über den Umfang der Stoff- und Energiewandlung im Bilanzraum bezüglich der eintretenden Exergie. In der Literatur wird ein Transit-Koeffizient [BRO94] vorgeschlagen, der die Transitexergie auf die eingesetzte Exergie bezieht und damit das Komplement zum Feedfaktor darstellt.

2.4 Exergetische Kennzahlen

Mit Hilfe der vorgestellten Exergiebilanzen und der Methode der exergetischen Transitbereinigung lassen sich Kennzahlen zur Bewertung der Stoff- und Energiewandlungen in einem Bilanzraum ableiten.

Die einfachste Möglichkeit der Bewertung resultiert aus der Exergiebilanz der Input-Output-Betrachtung, wie sie in Gleichung (2.13) angegeben ist. Der exergetische Gütegrad [FRA86, SOR94] setzt die austretende Exergie aus dem Bilanzraum zu der eintretenden Exergie ins Verhältnis:

$$\nu^{IN} = \frac{\dot{E}_{OUT}}{\dot{E}_{IN}}. \quad (2.22)$$

Der Gütegrad ist ein Maß der im Bilanzraum auftretenden dissipativen Exergieverluste und stellt damit eine Kennzahl für die Einschätzung des inneren Prozesses dar. Zur Bildung sind lediglich die eintretenden und austretenden Exergieströme erforderlich. Die Definition eines technologischen Nutzens ist bei der Bildung des Gütegrades, der auch als „simple efficiency“ [COE02] bezeichnet wird, nicht notwendig. Als Komplement lässt sich der exergetische Verlustgrad [FRA86] definieren:

$$\varepsilon_D^{IN} = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{IN}} = 1 - \frac{\dot{E}_{OUT}}{\dot{E}_{IN}}. \quad (2.23)$$

Für den reversiblen Grenzfall ist der Gütegrad eines Prozesses gerade Eins, da in diesem Fall keine Exergieverluste zu verzeichnen sind und somit die Exergie konstant bleibt. Die Exergieverluste realer Prozesse führen zu Abweichungen von dem Idealwert. Allerdings ist ein Vergleich der Effizienz verschiedener Prozesse mit dem Gütegrad nur schwer möglich, da durch die Einbeziehung aller austretenden Ströme und die enthaltene Transitexergie der Wertebereich nicht ausgeschöpft wird, sondern sich meist im Bereich zwischen 0.9 und 1 bewegt. Zudem werden dadurch die eigentlichen Verlustquellen im Prozess nicht herausgearbeitet. Die Kennzahl lässt sich jedoch sehr leicht bilden und erlaubt einen Vergleich von Prozessen mit ähnlichen Parametern.

Die Festlegung eines ökonomisch motivierten Nutzens von Prozessen, wie es in Abschnitt 2.2.3 beschrieben wurde, führt zur Definition des exergetischen Wirkungsgrades:

$$\eta^{IN} = \frac{\dot{E}_U}{\dot{E}_{IN}}, \quad (2.24)$$

wobei hier die austretenden Exergieströme E_{OUT} in Nutzexergie E_U und äußere Verluste E_L unterschieden werden. Diese Definition des Wirkungsgrades wird in der Literatur häufig verwendet [BAE88, BAE96, FRA86] und auch als „efficiency“ [GAG80] bezeichnet. Nachteilig an dieser Definition ist der Bezug auf alle eintretenden Exergieströme, so dass wie beim Gütegrad die Effizienz des Prozesses meist durch den Transit von Exergie überdeckt wird.

Unter Nutzung des Konzeptes der exergetischen Transitbereinigung und unter Bezug auf die Bilanzgleichung (2.17) lässt sich die Aussagekraft der Kennzahl erhöhen. Der transitbereinigte exergetische Wirkungsgrad bezieht die vom im Bilanzraum stattfindenden Prozess erzeugte Exergie E_P auf die dazu eingesetzte Feedexergie E_F :

$$\eta = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F}. \quad (2.25)$$

Während im unbereinigten Fall die gesamte in den Bilanzraum einströmende Exergie E_{IN} als Bezugsbasis einer Bewertung angesehen wird, führt die Transitbereinigung zu der Bezugsgröße E_F , die die im Prozess umwandelbare Exergie umfasst. Dadurch wird die Qualität des Stoff- oder Energiewandlungsprozesses unverfälscht beschrieben. Auch in der Literatur [FRA86, SOR94, BAE96, u.a.] wird dieser Definition des Wirkungsgrades meist der Vorzug gegeben. Man findet auch die Bezeichnung „rational efficiency“ [COE02] für das Verhältnis von gewünschtem Output zur verwendeten Exergie oder das Verhältnis von „exergy recovered“ zu „exergy supplied“ als entsprechende Kennzahl [CEN02]. Der dazu komplementäre Verlustgrad charakterisiert die exergetischen Verluste im Verhältnis zum eingesetzten Feedexergiestrom:

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_F} = 1 - \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F}. \quad (2.26)$$

Der Wertebereich des transitbereinigten exergetischen Verlustgrades reicht von 0 bis 1, wobei Prozesse, die vollständig reversibel ablaufen, durch einen Verlustgrad von 0 gekennzeichnet sind und als idealer Vergleichsmaßstab dienen. Die Einteilung in innere und äußere exergetische Verluste ermöglicht die Einschätzung, ob der irreversible Prozessablauf im Inneren oder die Erzeugung von unerwünschten Abprodukten die Ursache für die Abweichung vom idealen Prozess ist. Zu diesem Zweck lässt sich der Verlustgrad in einen inneren Verlustgrad

$$\varepsilon_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_F}, \quad (2.27)$$

der die dissipativen Verluste im Inneren eines Bilanzraumes widerspiegelt, und in einen äußeren Verlustgrad:

$$\varepsilon_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_F} \quad (2.28)$$

unterteilen. Der innere Verlustgrad lässt sich durch Veränderungen in der Prozessführung oder der Prozessbedingungen verbessern. Die äußeren Exergieverluste im Bilanzraum lassen sich zu dem noch durch die Nutzung der Abprodukte (Abwärmenutzung, Recycling, Kreislaufführungen) vermeiden.

In der vorliegenden Arbeit wird der transitbereinigte exergetische Wirkungsgrad bzw. der transitbereinigte exergetische Verlustgrad verwendet und kurz als Wirkungsgrad bzw. Verlustgrad bezeichnet.

2.5 Exergetische Bewertung strukturierter Systeme

Die bisher getroffenen Aussagen und Definitionen galten für einen einfachen Bilanzraum, ohne auf dessen Einbindung in ein komplexes System einzugehen. Die vorgestellten transitbereinigten Bewertungskennzahlen lassen sich unter dem Blickwinkel eines Gesamtsystems und dessen Struktur zu thermodynamisch begründbaren Kennzahlen zusammenfassen und ermöglichen eine umfassende exergetische Bewertung der im System auftretenden Stoffwandlungsprozesse.

2.5.1 Besonderheiten der Bewertung

Die Zielstellung bei der Bewertung komplexer Systeme der Stoff- und Energiewandlung ist es, möglichst detaillierte Aussagen zur Effektivität der Systemelemente zu generieren und Aussagen für Prozessverbesserungen zu gewinnen. Komplexe Anlagen lassen keine aussagekräftige exergetische Analyse und Bewertung zu, die nur auf der Evaluierung der Effektivität der einzelnen Elemente bzw. Prozessschritte beruht. Vielmehr muss auch die Struktur des Systems und die Abhängigkeit der Elemente untereinander sowie die Kopplung mit der Systemumgebung in die Bewertung einbezogen werden.

Die Strukturierung derartiger komplexer Systeme erfolgt durch die Einführung von Hierarchieebenen, wie es in Abschnitt 1.3.2 erläutert wurde. Dazu wird das betrachtete Verfahren (erste Hierarchieebene) in Teilsysteme (zweite Hierarchieebene) gegliedert, in denen abgrenzbare Umwandlungsstufen realisiert werden. Diese Teilsysteme lassen sich wiederum in Einzelapparate (dritte

Hierarchieebene) unterteilen, in denen die verfahrenstechnischen Grundoperationen durchgeführt werden. Nur mit der Einführung einer hierarchischen Gliederung in Gesamtsystem, Teilsystem und Apparat lässt sich der Einfluss der Systemstruktur mit Kennzahlen beschreiben, so wie sie in Kapitel 2.5.4 definiert und diskutiert werden. Diese Kennzahlen ermöglichen eine Bewertung auf jeder dieser Ebenen und die Einordnung der Bedeutung innerhalb der nächsthöheren Hierarchiestufe.

Bei der Bewertung eines Systems wurde die Exergie der Haupt- und Nebenprodukte des Systems und seiner Komponenten als Produktexergie betrachtet, da als Unterscheidungskriterium zu den Abprodukten die Nutzung innerhalb oder außerhalb des Systems angesehen wurde.

Ein weiterer Problemkreis bei der Systembewertung stellt die Verlustallokation auf die Einzelelemente des Systems dar, da eine verursachungsgerechte Verteilung der inneren und äußeren Exergieverluste eines Systems angestrebt wird.

2.5.2 Behandlung äußerer Exergieverluste

Ein komplexes System der Stoffwandlung ist meist durch mehrere austretende Stoff- und Energieströme gekennzeichnet und umfasst die Exergieströme der Haupt- und Nebenprodukte sowie der Abfallstoffe. Im Zuge dieser Unterscheidung lassen sich Nutzexergieströme, die sowohl die Hauptprodukte als auch die Nebenprodukte umfassen, und Abfallexergieströme unterscheiden, wobei letztere die äußeren Exergieverluste E_L des Gesamtsystems darstellen.

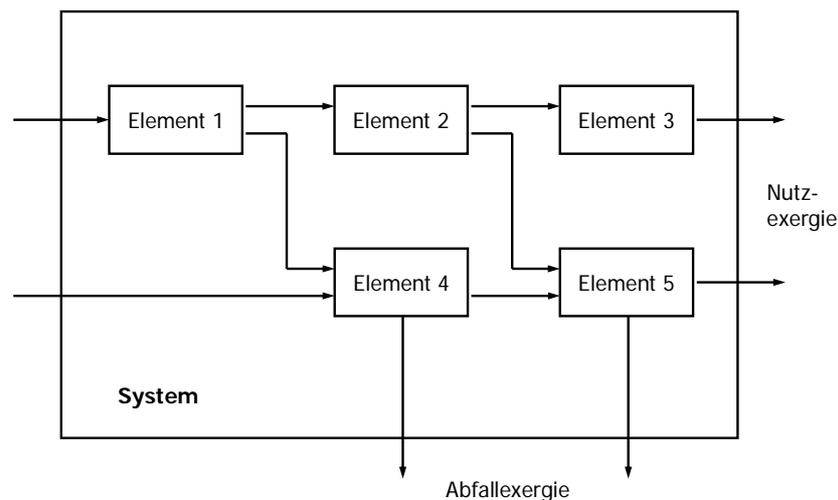


Abbildung 2.6: Exergiebilanz eines Systems mit Nutz- und Abfallexergieströmen

Die Bewertung von komplexen Systemen erfordert eine möglichst genaue, begründbare Zuordnung aller auftretenden Verluste auf die Elemente des Systems, um speziell die Ursachen der äußeren Verluste im System zu bestimmen. Bei den inneren Exergieverlusten stellt sich das Problem der Zuordnung nicht, da diese Verluste eindeutig dem Element zurechenbar sind. Die äußeren Verluste hingegen treten erst an der Bilanzgrenze des Gesamtsystems auf und müssen möglichst verursachungsgerecht den Elementen des Systems zugeordnet werden. Es ist nicht zielführend, die äußeren Verluste in Abbildung 2.6 diskussionslos den Elementen 4 und 5 anzulasten. Vielmehr ist zu prüfen, welches Element im System diese Verluste generiert. Dabei können die drei Fälle direkter äußerer Verlust, indirekter äußerer Verlust und systembedingter äußerer Verluste unterschieden werden. Mit dieser Fallunterscheidung lässt sich die allgemeine transitbereinigte Exergiebilanz für jedes Element des Systems nach der Gleichung (2.17) weiter hinsichtlich der äußeren Exergieverluste untergliedern und man erhält somit:

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_W + \dot{E}_V + \dot{E}_D, \quad (2.29)$$

wobei E_W die direkten und E_V die indirekten äußeren Exergieverluste beschreibt. Der systembedingte äußere Verlust ist dem System als Ganzes zuzuordnen und ist deshalb in der Bilanzgleichung nicht enthalten.

2.5.2.1 Direkter äußerer Exergieverlust

Im diesem ersten Fall handelt es sich um äußere Exergieverluste, bei denen ein direkter Fluss von ungenutzter Exergie vom betrachteten Systemelement nach außen existiert, den das Element zu verantworten hat und der nicht von anderen Elementen des Systems verursacht wird. Diese direkten äußeren Exergieverluste E_W können wie die inneren Verluste ohne weiteres dem verursachenden Element zugeordnet werden und beeinflussen hinsichtlich der Bewertung auch keine weiteren Elemente im System.

Ein direkter äußerer Verlust ist beispielsweise Exergie, die durch Abstrahlung von einem Reaktor, in dem eine exotherme Reaktion abläuft, an die Umgebung abgegeben wird. Es ist also eine elementbedingte Ursache für einen derartigen Verlust gegeben.

2.5.2.2 Indirekter äußerer Exergieverlust

Problematisch ist die Zuordnung im zweiten Fall, da hier das an der Systemgrenze liegende Element nicht für die äußeren Exergieverluste verantwortlich gemacht werden kann. In diesem Fall muss der äußere Verlust in einem Element, das im Inneren des Systems und damit im Vorfeld des

Randelemente angeordnet ist, seine Ursache haben. Dieses innere Element erzeugt einen Exergiestrom, der an der Systemgrenze als äußerer Verlust auftritt, aber zuvor noch durch andere Elemente des Systems als indirekter äußerer Exergieverlust E_V strömt. Ein Beispiel, das in Abbildung 2.7 illustriert wird, soll die Problematik erläutern.

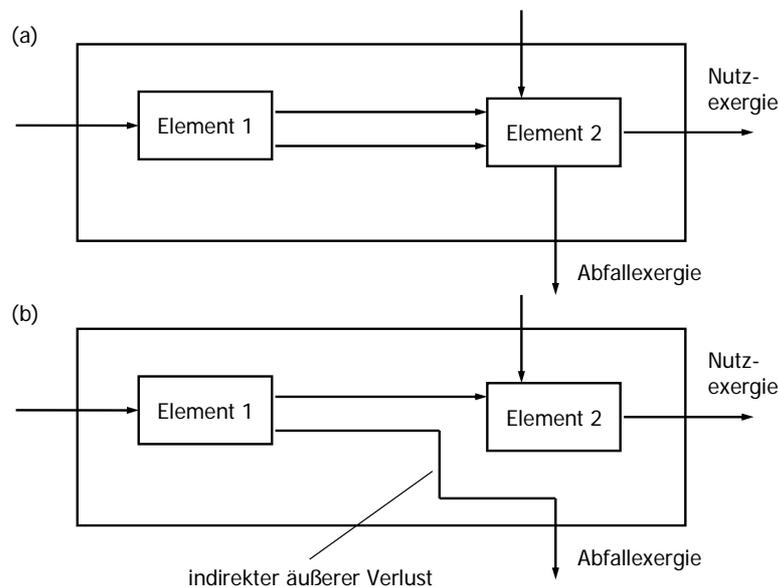


Abbildung 2.7: Schema des indirekten äußeren Exergieverlustes

Das betrachtete System besteht aus zwei Elementen, wobei Element 1 ein Reaktor ist, in dem eine exotherme chemische Reaktion abläuft. Aus den dabei entstehenden heißen Abgasen soll in einem Wärmetauscher, der hier als Element 2 bezeichnet wird, die thermische Exergie ausgekoppelt werden. In dieser Situation (Variante (a) der Abbildung) strömt von Element 1 zu Element 2 nicht nur die thermische Exergie, sondern auch die Konzentrationsexergie der Abgase, die im Wärmetauscher nicht genutzt werden kann. Folglich ist es auch aus technologischer Sicht nicht gerechtfertigt, die äußeren Exergieverluste, die durch die nicht genutzte Konzentrationsexergie hervorgerufen werden, dem Wärmeübertrager anzulasten. Vielmehr ist die Ursache der äußeren Exergieverluste in der chemischen Reaktion und damit im Element 1 zu suchen. Daher wird dieser Verlust Element 1 als indirekter äußerer Verlust E_V zugeordnet, während er als Verlusttransit gedanklich um Element 2 herumgeführt wird (Variante (b) der Abbildung). Dies bedeutet, dass für jeden äußeren Verlust eines Systems die Ursache im System lokalisiert werden kann. Die so bestimmten indirekten äußeren Exergieverluste E_V verringern auf ihrem Weg bis zur Systemgrenze die vorhandene nutzbare Exergie E . Für die vom indirekten äußeren Verlust durchströmten Elemente ist dieser dem regulären Exergietransit zuzuordnen, da der Verlusttransit nicht für eine Umwandlung zur Verfügung steht.

Vorteilhaft an dieser Vorgehensweise ist die verursachungsgerechte Zuordnung äußerer Verluste, so dass nicht nur Elemente, die einen direkten, nicht genutzten Exergiefluss in die Umgebung aufweisen, belastet werden können, sondern auch Elemente im Inneren des Systems. Damit wird anhand technisch-technologischer Gründe eine Verlustzuordnung vorgenommen. Darüber hinaus ist es nicht erforderlich, eine so genannte „produktive Struktur“ [GHE02] zu erarbeiten, die die Definition eines Produktstroms für jedes Systemelement und die Einführung von imaginären Komponenten zur Verteilung und Mischung dieser Produktströme erfordert. Vielmehr dient hier das technologische Schema als Grundlage, es wird lediglich ein Anteil nicht nutzbarer Exergie eines Exergiestromes im System bestimmt.

2.5.2.3 Systembedingter äußerer Exergieverlust

Neben den direkten und indirekten äußeren Verlusten, die den Systemelementen zugeordnet werden können, sind auch äußere Verluste denkbar, die durch die Systemelemente nicht beeinflusst werden können. Beispielsweise kann es Anteile der Einsatzstoffe geben, die im System aufgrund fehlender oder nicht vorgesehener technologischer Schritte nicht produktiv genutzt werden können und das System ohne Umwandlung als Exergieverlust verlassen. Derartige äußere Verluste, die in den Systemelementen durchgängig als Transitexergie erfasst werden, sind gesondert zu erfassen und werden als systembedingte äußere Exergieverluste bei der Bewertung des gesamten Verfahrens berücksichtigt.

2.5.3 Exergieformen

Die Betrachtung eines einzelnen Bilanzraumes nach Gleichung (2.29) zeigt, dass der eintretende Feedexergiestrom in den Produktexergiestrom umgewandelt wird und dabei direkte und indirekte äußere Exergieverluste sowie innere Exergieverluste entstehen. Der Produktexergiestrom E_p ist daher die Ursache für die auftretenden Verluste und hat diese zu verantworten. Folglich sind diesem Strom die bereits realisierten inneren und die direkten äußeren Exergieverluste zuzurechnen. Zudem besteht E_p aus einem Anteil nicht mehr nutzbarer Exergie (indirekte äußere Exergieverluste). Alle Exergieverluste lassen als „exergetischen Rucksack“ der Produktexergie bezeichnen.

Überträgt man diese Betrachtung auf Exergieströme in einem komplexen System, dann wird der „exergetische Rucksack“ durch jede Umwandlungsstufe größer, d. h. die exergetischen Verluste werden aufsummiert. Verallgemeinert man diesen Aussagen, so ergibt sich nachfolgendes Schema:

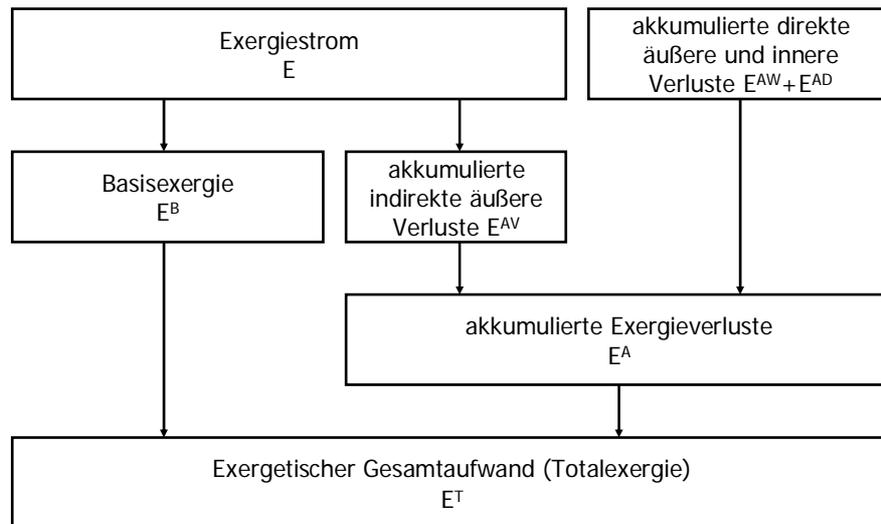


Abbildung 2.8: Basisexergie und akkumulierte Exergieverluste

Wie sich Abbildung 2.8 entnehmen lässt, wird die noch nutzbare Exergie eines Exergiestromes E im System als Basisexergie E^B bezeichnet. Alle Exergieverluste innerhalb des betrachteten Systems, die zur Erzeugung der Basisexergie angefallen sind, werden zu den akkumulierten Exergieverlusten E^A („exergetischer Rucksack“) zusammengefasst. Die Summe aus Basisexergie und akkumulierten Exergieverlusten bildet den exergetischen Gesamtaufwand ab. Dieser wird auch als Totalexergie bezeichnet. Diese Exergieformen werden im Folgenden näher betrachtet.

2.5.3.1 Basisexergie

Der Ausgangspunkt zur Bestimmung der Basisexergie ist die real vorhandene Exergie eines Stoff- oder Energiestromes. Von dieser werden die oben diskutierten indirekten äußeren Exergieverluste abgezogen. Da in einem komplexen System mehrere Quellen dieser Verluste existieren können, müssen alle derartigen indirekten Exergieverluste, die ein Strom zu tragen hat, berücksichtigt werden. Dazu werden die relevanten indirekten äußeren Exergieverluste aufsummiert und man erhält die akkumulierten äußeren Exergieverluste. Die akkumulierten äußeren Verluste umfassen alle Teile des Exergiestromes, die am Austritt aus dem Bilanzraum des Gesamtsystems den äußeren Verlusten zugeordnet werden, deren Ursachen aber in einem Systemelement liegen, das vor dem betrachteten Exergiestrom im System angeordnet ist.

$$\dot{E}^B = \dot{E} - \dot{E}_V^A. \quad (2.30)$$

Der damit in Gleichung (2.30) bestimmte Basisexergiestrom ist demnach der Teil des Exergiestromes, der für weitere Umwandlungen im System verwendet werden kann oder – im Fall des Austritts aus dem System – einen Teil des Systemnutzens darstellt.

Betrachtet man keinen einzelnen Exergiestrom, sondern einen Bilanzraum im System, dann ergibt sich die Basisexergie der Produkte durch die Subtraktion innerer und äußerer Exergieverluste von der in den Bilanzraum eintretenden Feedexergie:

$$\dot{E}_P^{B*} = \dot{E}_F - (\dot{E}_W + \dot{E}_V + \dot{E}_D). \quad (2.31)$$

Da die Produktströme ihrerseits wiederum als Feedexergie in nachfolgenden Bilanzräumen in Erscheinung treten können, muss die Basis-Feedexergie als Ausgangspunkt angesetzt werden. Dadurch erhält man für die Basisexergie der Produkte:

$$\dot{E}_P^B = \dot{E}_F^B - (\dot{E}_W + \dot{E}_V + \dot{E}_D). \quad (2.32)$$

Nur durch die Abgrenzung der Basisexergie von der real vorhandenen Exergie eines Stoff- oder Energiestrom werden die Ursachen für indirekte äußere Exergieverluste berücksichtigt und es gelingt eine gerechte Verlustaufteilung im System. Das dazugehörige Bilanzschema zeigt nachfolgende Abbildung.

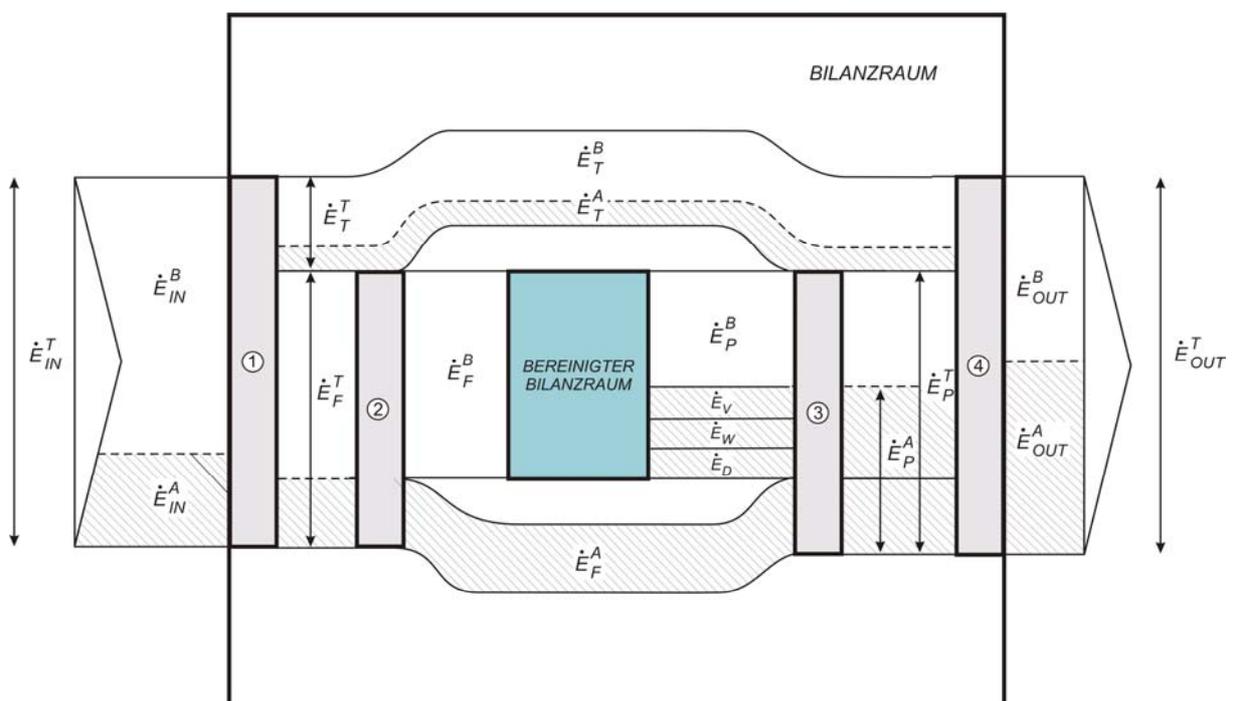


Abbildung 2.9: Exergiebilanz bei Berücksichtigung akkumulierter Exergieverluste

Man erkennt, dass die eintretenden Exergieströme zunächst an der Stelle (1) nach dem Konzept der Transitbereinigung in Feedexergie und Transitexergie aufgeteilt werden. Anschließend wird die Feedexergie bei (2) in die Basisexergiekomponente und die Komponente der akkumulierten Exergieverluste aufgeteilt. In den zweifach bereinigten Bilanzraum, der sich innerhalb eines komplexen Systems befindet, tritt so nur die Basiskomponente der Feedexergie ein. Als Produkt verlässt der Basisanteil der Produktexergie den Bilanzraum, während die inneren und äußeren Exergieverluste mit dem akkumulierten Exergieanteil der Feedexergie an der Stelle (3) zusammengeführt werden. Nach der Zuordnung der Transitexergie bei (4) erhält man die austretende Exergie.

2.5.3.2 Akkumulierte Exergieverluste

Die bei der Erzeugung eines Basisexergiestroms insgesamt aufgetretenen Exergieverluste setzen sich aus zwei Komponenten zusammen. Zunächst sind die exergetischen Verluste, die in einem Systemelement auftreten können, zu bestimmen. Hierzu zählen die direkten äußeren Exergieverluste, die indirekten äußeren Exergieverluste und die inneren Exergieverluste:

$$\dot{E}^A = \dot{E}_W + \dot{E}_V + \dot{E}_D. \quad (2.33)$$

Diese Verluste sind von den Produktströmen des Elementes in Abhängigkeit von ihrer Exergie zu tragen und bestimmen den exergetischen Aufwand ihrer Erzeugung. Die aus einem Element austretenden Produktströme sind ihrerseits wieder Feedexergieströme der nachfolgenden Systemelemente, so dass bei der Berechnung der akkumulierten Exergieverluste der Produkte als zweite Komponente auch die bereits vorhandenen akkumulierten Exergieverluste der Feedexergie zu berücksichtigen sind:

$$\dot{E}_P^A = \dot{E}_F^A + \dot{E}_W + \dot{E}_V + \dot{E}_D. \quad (2.34)$$

In dieser Weise akkumulieren sich die Exergieverluste entlang des Flusses der Produktexergie, d. h. die aufsummierten Exergieverluste nehmen bei dem Durchströmen von Systemelementen stetig zu. Nur in reversibel arbeitenden Elementen würden die akkumulierten Exergieverluste konstant bleiben. Im Mehr-Produkt-Fall werden die akkumulierten Exergieverluste nach der Exergie der Produkte aufgeteilt. Damit ist diese Größe gut geeignet, um die Effektivität der Erzeugung von Exergieströmen abzubilden, da als Vergleichsmaßstab der reversible Prozess fungiert.

2.5.3.3 Totalexergie

Der Gesamtaufwand, der sich durch die Addition von Basisexergie und akkumulierten Exergieverlusten ermittelt, wird Totalexergie genannt:

$$\dot{E}^T = \dot{E}^B + \dot{E}^A. \quad (2.35)$$

Die so definierte Totalexergie ist ähnlich der Energie eine Erhaltungsgröße, da die in einen Bilanzraum eintretende Totalexergie gleich der austretenden Totalexergie ist:

$$\dot{E}_{IN}^T = \dot{E}_{OUT}^T, \quad (2.36)$$

da sowohl die noch nutzbare Exergie als auch die akkumulierten Exergieverluste des Bilanzraumes berücksichtigt werden. Diese Beziehung gilt nicht nur für einen einzelnen Bilanzraum, sondern für das gesamte System.

Mit den Exergieformen Basisexergie, akkumulierte Exergieverluste und Totalexergie lassen sich Exergieströme im System im Hinblick auf die Effektivität ihrer Erzeugung untersuchen.

2.5.4 Definition systembezogener Kennzahlen

Mit der Zuordnung der äußeren Exergieverluste und der Definition der Basisexergie kann nun ein Kennzahlensystem zusammengestellt werden, das eine umfassende Einschätzung einer komplexen Anlage der Stoff- und Energiewandlung ermöglicht. Den Ausgangspunkt bildet die Strukturierung des zu bewertenden Systems. Im nachfolgenden Abschnitt wird von der hierarchischen Gliederung des Systems, wie sie im Abschnitt 2.5.1 vorgenommen wurde, ausgegangen. Daher wird die Vorgehensweise auch als hierarchisch strukturierte exergetische Analyse bezeichnet [HEB86, HEB90]. Es werden daher die drei Hierarchiestufen Gesamtsystem, Teilsystem und Apparat betrachtet, wobei zunächst die Definitionen allgemein für Elemente E, die sich in einem übergeordneten System S befinden, vorgenommen werden. Die exergetische Bewertung von Systemelementen, eingebettet in eine hierarchische Struktur, muss zwei Komponenten berücksichtigen: die exergetische Effizienz des Elementes und die Bedeutung des Elementes für das System.

Für die Einschätzung der Effizienz können alle im Abschnitt 2.4 eingeführten exergetischen Kennzahlen herangezogen werden. Für die hierarchische Bewertung ist die Verwendung des exergetischen Verlustgrades vorteilhaft, da der Verlustgrad die Eigenschaft der Additivität aufweist, d. h. die additive Verknüpfung der Verlustgrade der Systemelemente kann zur Bewertung des Systems genutzt werden. Im Gegensatz dazu hat der Wirkungsgrad die Eigenschaft der multiplikativen

Verknüpfung. Daher wird als Effizienzkennzahl des Elementes der exergetische Verlustgrad verwendet:

$$\varepsilon^E = \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_F^B} = \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_V + \dot{E}_W}{\dot{E}_F^B}, \quad (2.37)$$

der auf der Exergiebilanzgleichung (2.29) aufbaut. Es werden alle Verlustterme des Elements berücksichtigt und auf die umwandelbare Feedexergie bezogen. Dabei ist bei der Bestimmung der Feedexergie zu berücksichtigen, dass nur die Basisexergie für das Element maßgeblich ist und die akkumulierten indirekten Exergieverluste bereits den verursachenden Elementen zugeordnet wurden. Damit definiert man eine Kennzahl, die die Effizienz der Prozesse eines Elementes im System unter Berücksichtigung der nutzbaren Exergie angibt. Eine Aufteilung in einen inneren Verlustgrad

$$\varepsilon_D^E = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_F^B} \quad (2.38)$$

und einen äußeren Verlustgrad

$$\varepsilon_L^E = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_F^B} \quad (2.39)$$

ist zur Einschätzung der Ursachen der Exergieverluste und zur Ableitung von Verbesserungsvorschlägen zweckmäßig.

Die Effizienz eines Systemelementes beeinflusst die exergetische Effizienz des Systems in Abhängigkeit von dessen Bedeutung im System. Daher muss der Einfluss der Systemstruktur mit einer Kennziffer erfasst werden. Die Bedeutung des Elementes hängt von der im Element nutzbaren Exergie zur nutzbaren Exergie des Systems oder allgemein der nächsthöheren Hierarchiestufe ab. Diese Herangehensweise führt zum exergetischen Wichtungsfaktor, der dieses Verhältnis beschreibt:

$$\kappa^E = \frac{\dot{E}_F^B}{\dot{E}_{F,S}^B}. \quad (2.40)$$

Dieser Wichtungsfaktor zeigt, welcher Teil der dem System zugeführten nutzbaren Exergie im Element zur Umwandlung zur Verfügung steht. Der Wertebereich dieser Kennzahl ist größer als Null, wobei der Wichtungsfaktor im Bereich größer als Eins auf Rückführungen und Kreislaufströmungen innerhalb des Systems hindeutet. Es ist offensichtlich, dass Elemente, die einen hohen

Wichtungsfaktor aufweisen, auch für die Effektivität des Gesamtsystems von besonderer Bedeutung sind.

Die Zusammenführung der Effektivitätskennzahl des Elementes (exergetischer Verlustgrad) und der Kennzahl der Systemstruktur (Wichtungsfaktor) gibt die Bedeutung der Exergieverluste im Element hinsichtlich der Effizienz der nächsthöheren Hierarchiestufe an. Der Verlustbeitrag eines Elementes

$$\lambda^E = \kappa^E \varepsilon^E \quad (2.41)$$

wird durch die multiplikative Verknüpfung von Wichtungsfaktor und Verlustgrad definiert. Der Verlustbeitrag lässt sich auch als das Verhältnis der inneren und äußeren Exergieverluste des Elementes zur nutzbaren Exergie der nächsthöheren Hierarchieebene deuten, wie Gleichung (2.42) zeigt:

$$\lambda^E = \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_{F,S}^B}. \quad (2.42)$$

Mit dieser Kennzahl lassen sich die Ursachen exergetischer Verluste in einem System lokalisieren und im Rahmen ihrer Bedeutung für das System einschätzen. Systemelemente, die einen hohen Verlustbeitrag aufweisen, sind als Hauptansatzpunkte für Effektivitätsverbesserungen auszuwählen, da hier die bedeutsamsten Exergieverluste im System auftreten.

Die Summation aller Verlustbeiträge der Elemente einer Hierarchiestufe ergibt den Verlustgrad der nächsthöheren Hierarchieebene, so dass für den Verlustgrad des Systems folgt:

$$\varepsilon^S = \sum_E \lambda^E = \sum_E \kappa^E \varepsilon^E. \quad (2.43)$$

Die definierten Kennzahlen Verlustgrad, Wichtungsfaktor und Verlustbeitrag bilden ein in sich geschlossenes Bewertungssystem, das eine detaillierte Analyse und Bewertung eines komplexen Systems erlaubt. Die allgemein hergeleiteten Kennzahlen lassen sich auf allen Hierarchieebenen anwenden. Für die Gliederung eines Systems in Gesamtsystem-, Teilsystem- und Apparateebene sind die Kennzahlen in nachstehender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 2.3: Exergetische Bewertungskennzahlen

	Teilsystem im Gesamtsystem	Apparat im Teilsystem
Verlustgrad	$\varepsilon^{SS} = \frac{\dot{E}_{D,SS} + \dot{E}_{L,SS}}{\dot{E}_{F,SS}^B}$	$\varepsilon^U = \frac{\dot{E}_{D,U} + \dot{E}_{L,U}}{\dot{E}_{F,U}^B}$
Wichtungsfaktor	$\kappa^{SS} = \frac{\dot{E}_{F,SS}^B}{\dot{E}_{F,TS}^B}$	$\kappa^U = \frac{\dot{E}_{F,U}^B}{\dot{E}_{F,SS}^B}$
Verlustbeitrag	$\lambda^{SS} = \frac{\dot{E}_{D,SS} + \dot{E}_{L,SS}}{\dot{E}_{F,TS}^B} = \kappa^{SS} \varepsilon^{SS}$	$\lambda^U = \frac{\dot{E}_{D,U} + \dot{E}_{L,U}}{\dot{E}_{F,SS}^B} = \kappa^U \varepsilon^U$

Mit diesem Kennzahlensystem lässt sich ein in drei Hierarchieebenen strukturiertes System vollständig bewerten. Für den Gesamtwirkungsgrad des Systems erhält man:

$$\eta^{TS} = 1 - \left(\sum_{SS} \lambda^{SS} + \lambda^{TS} \right) = 1 - \left(\sum_{SS} \kappa^{SS} \varepsilon^{SS} + \lambda^{TS} \right) \quad (2.44)$$

bzw.

$$\eta^{TS} = 1 - \left(\sum_{SS} \kappa^{SS} \sum_{U_{SS}} \lambda^{U_{SS}} + \lambda^{TS} \right), \quad (2.45)$$

wobei hier noch jeweils ein Term λ^{TS} , der die systembedingten äußeren Verluste beschreibt, berücksichtigt wird.

2.5.5 Bewertung mit dem Basisexergiefaktor

Zusätzlich zu den vorgestellten Kennzahlen der hierarchisch strukturierten Bewertung kann mit Hilfe der vorgestellten Herangehensweise (Transitbereinigung, äußere Exergieverluste, Basisexergie) eine Einschätzung der im System vorhandenen Exergieströme bezüglich der Effektivität ihrer Erzeugung getroffen werden. Dies ist von besonderer Bedeutung, wenn Kuppelprodukte des analysierten Systems hinsichtlich ihres exergetischen Aufwandes bewertet werden müssen.

Zu diesem Zweck wird die tatsächlich nutzbare Exergie in einem Stoff- oder Energiestrom, der zwischen zwei Systemelementen oder zwischen einem Systemelement und der Systemumgebung fließt, ins Verhältnis zu dem dazu getätigten exergetischen Aufwand gesetzt.

Unter Zuhilfenahme der beiden neu eingeführten Größen Basisexergie und Totalexergie lässt sich nun der Basisexergiefaktor als Bewertungskennzahl für jeden Exergiestrom im System definieren:

$$\omega = \frac{\dot{E}^B}{\dot{E}^T} \quad (2.46)$$

Diese Kennzahl gibt innerhalb eines Wertebereiches von Null bis Eins das Verhältnis von Basisexergie zu aufgewandter Exergie an. Die Exergieströme, die nicht von Exergieverluste des betrachteten Systems betroffen sind, wie z. B. alle in das System eintretenden Exergieströme, zeichnen sich durch einen Basisexergiefaktor von genau Eins aus. Im Gegensatz dazu sind Abfallexergieströme des Systems durch einen Basisexergiefaktor von Null charakterisierbar, da sie keine Basisexergie besitzen. Alle Exergieströme eines Systems sind somit durch einen bestimmten Basisexergiefaktor gekennzeichnet und können damit im Hinblick auf die Effektivität ihrer Erzeugung verglichen werden. Darüber hinaus kann durch genaue Analyse der systeminternen Ströme die Quelle der Verluste detektiert werden. Somit existiert neben dem geschlossenen exergetischen Bewertungsmodell auf der Basis der Elemente eines Systems ein weiteres Modell, das sich auf die Exergieströme des Systems stützt.

2.5.6 Ableitung von Verbesserungspotentialen

Durch das hierarchisch strukturierte Kennzahlensystem können alle Ebenen eines Verfahrens analysiert und die Auswirkungen von exergetischen Verlusten auf die Effektivität des Gesamtsystems angegeben werden.

Die Analyse beginnt auf der Ebene des Gesamtsystems, wo die exergetische Effektivität mit Hilfe des Verlustgrades eingeschätzt werden kann. Die Betrachtung der Einsatzstoffe und der zu erzeugenden Produkte lassen Aussagen über die Effektivität des gewählten Verfahrens zu, ermöglichen einen Vergleich mit alternativen Verfahren und geben Auskunft über die mit dem Produktionsprogramm prinzipiell einhergehenden Verluste. Zudem erlaubt der Basisexergiefaktor einen detaillierten Vergleich der Kuppelprodukte des Systems, da hierbei die zu ihrer Erzeugung eingesetzte Exergie als Vergleichsmaßstab dient.

Dem schließt sich eine tiefer gehende Analyse durch Bewertung der Struktureinheiten an, so dass mit Hilfe der Kennzahlen die Verlustursachen im System lokalisiert werden können. Dabei können

innere und äußere Verluste unterschieden werden, wobei die verursachergerechte Zuordnung der äußeren Exergieverluste die Analyse erleichtert. Die Verlustbeiträge zeigen an, welche Struktureinheiten maßgeblich die Effektivität beeinträchtigen und wo folglich Verbesserungsmaßnahmen und innovative Konzepte anzusetzen sind. Durch die Berechnung der Basisexergie kann die Entwicklung des Basisexergiefaktors im komplexen System untersucht werden, was ebenfalls Schwachpunkte des Verfahrens offen legt.

2.5.7 Vergleich mit alternativen Bewertungsmethoden

Zur Lösung von energetischen und exergetischen Bewertungsaufgaben wurde eine Vielzahl von Vorgehensweisen entwickelt. Im Folgenden werden zwei Konzepte kurz umrissen und mit der vorgestellten Bewertungsmethode verglichen.

2.5.7.1 Systembewertung mit Matrizen

Eine Möglichkeit der Beschreibung von komplexen Systemen, die zahlreiche Relationen aufweisen, ist die Matrizendarstellung. Diese Methode findet vor allem bei der Betrachtung von volkswirtschaftlichen Verflechtungen ihre Anwendung [HOL94a, HOL94b]. Neben der Aufstellung von Verflechtungsbilanzen zwischen den Sektoren einer Volkswirtschaft lässt sich diese Methode auch zur Modellierung von Produktionsprozessen nutzen, wobei die Sektoren dann die einzelnen Produktionsprozesse innerhalb einer Technologie symbolisieren [DYC98]. Das Ziel dieser Vorgehensweise ist beispielsweise die Bestimmung des Materialbedarfs einer Produktionsvariante, wozu die Relationen zwischen den Prozessen erfasst werden. Falls von einem linear-limitationalen Produktionsmodell ausgegangen wird, können feste Produktionskoeffizienten zur Beschreibung der Relationen verwendet werden, die das Verhältnis von der eingesetzten Menge des Faktors i zur Produktion der Menge j angeben:

$$a_{ij} = \frac{\text{Inputeinheit}}{\text{Outputeinheit}} \quad (2.47)$$

Diese Produktionskoeffizienten werden in eine Matrix aufgenommen, deren Zeilen und Spalten durch die Produktionsprozesse, d. h. die Elemente des Systems, gebildet werden. Da die Matrix alle Verflechtungen des Systems enthält, wird sie auch als Verflechtungsmatrix bezeichnet [DYC98]. Mit Hilfe dieser Verflechtungsmatrix A kann nun ein lineares Leontief-Modell zur Beschreibung der Produktionstechnologie aufgestellt werden:

$$r = Ar + y, \quad (2.48)$$

wobei r den Vektor der eingesetzten Faktoren, der sowohl die von außen bezogenen als auch die intern erstellten Vorleistungen des Systems umfasst, darstellt. Der Vektor y bildet die Outputgrößen, d. h. die erzeugten Produkte, ab. Durch Umstellung dieser Matrixgleichung mit Hilfe der Einheitsmatrix E lassen sich die einzusetzenden Faktoren r zur Erzeugung eines Produktprogramms y bestimmen:

$$r = (E - A)^{-1} y. \quad (2.49)$$

Diese Beziehungen werden in der Ökonomie für die Betrachtung von Stoffstromnetzen verwendet [DIH97, DYC00]. Falls eine Produktionsfunktion mit thermodynamischen Grundlagen verwendet wird, erhält man eine entsprechende thermodynamische Transformationsfunktion, die die Input-Output-Beziehungen von Stoff- und Energiewandlungen eines Systems beschreibt [SPR98].

Diese Zusammenhänge wurden zur Entwicklung der so genannten „Structural Theory“ genutzt, die besonders von VALERO vorangetrieben wurde [TOR99, VAL02b, VAL02c, VAL03a]. In diesem Modell wird eine thermodynamische Analyse von komplexen Systemen auf Basis der Exergie vorgenommen. Dazu muss die Struktur des Systems in eine „produktive Struktur“ überführt werden. Die Produktionskoeffizienten a_{ij} des ökonomischen Modells werden hier als exergetische Aufwandseinheiten aufgefasst, da sie den Aufwand an Feedexergie i zur Erzeugung von einer Einheit Produktexergie j beschreiben:

$$a_{ij} = \frac{E_{Fi}}{E_{Pj}}. \quad (2.50)$$

Diese Aufwandseinheiten lassen sich ebenfalls in eine Verflechtungsmatrix eintragen und ähnlich wie im ökonomischen Anwendungsfall zur Bestimmung des exergetischen Aufwandes der Produktexergien nutzen. Die Inverse dieser Aufwandseinheit repräsentiert den exergetischen Wirkungsgrad der Erzeugung der Produktexergie [VAL02c]. Das Modell lässt sich ohne weiteres durch die Einbeziehung von spezifischen Exergiekosten zur Thermoökonomie erweitern und damit zur Analyse der Kostenentstehung nutzen [TOR99].

Diese Vorgehensweise weist Gemeinsamkeiten mit der vorgestellten Bewertungsmethode auf, da hier ebenfalls auf exergetischer Basis eine Analyse der Verflechtungen in komplexen Systemen vorgenommen wird. Allerdings werden nur die Verflechtungen auf einer Ebene des Systems untersucht und keine Bewertungsgrößen der Systemstruktur angegeben. In der Structural Theory ist die umwandlungsorientierte Form der Transitbereinigung enthalten, was auch in den Aufwandseinhei-

ten, die die Feedexergie auf die Produktexergie beziehen, deutlich wird. Mit dem Modell lässt sich sehr einfach die Totalexergie eines betrachteten Produktes bestimmen und somit auch der Basisexergiefaktor berechnen.

2.5.7.2 Lebenszyklusanalysen

Neben der Bewertung der Effizienz von Systemen und ihrer Komponenten existieren auch diverse Konzepte, deren Schwerpunkt die Einschätzung und der Vergleich des gesamten energetischen oder exergetischen Aufwandes zur Erzeugung von Produkten ist.

Eine Möglichkeit ist die Bestimmung des kumulierten Energieaufwandes (KEA) eines Produktes. Der KEA „gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwandes an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomisches Gutes (...) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann“ [VDI97a]. Der KEA wird anhand der Lebenszyklen in einen KEA_H der Herstellung, einen KEA_N der Nutzung und einem KEA_E der Entsorgung des betrachteten Produktes unterschieden. In diesem Fall müssen die Bilanzgrenzen entsprechend groß gewählt werden und eine Prozesskettenanalyse, die eine energetische Input-Output-Analyse darstellt, durchgeführt werden. In diese Prozessbilanz treten alle Aufwendungen an Primärenergie und Rohstoffen zur Herstellung von Haupt- und Nebenprodukten ein. Nicht berücksichtigt werden bei dieser Vorgehensweise die Umweltenergie, wie beispielsweise die Energie der Luft, und die Anwendungen an menschlicher Arbeit [VDI95, VDI97a, VDI97b].

Als Bewertungsgröße des Ressourcenbedarfes kann der Bereitstellungsnutzungsgrad angegeben werden, der für Endenergien den Wirkungsgrad der gesamten Prozesskette von der Primärenergie-trägergewinnung bis zur Bereitstellung der Endenergie umfasst:

$$g = \frac{H_U}{KEA}. \quad (2.51)$$

Daher wird bei Endenergien der untere Heizwert auf den kumulierten Energieaufwand an eingesetzten Brennstoffen bezogen. Im Fall von Kuppelproduktionen wird der KEA energetisch auf die Zielprodukte aufgeteilt [VDI97a].

Die Methode des KEA hat mit der vorgestellten exergetischen Bewertungsmethodik gemein, dass in einer Prozessbilanz alle Aufwendungen erfasst werden. Daher ist der Bereitstellungsnutzungsgrad dem Basisexergiefaktor, der ebenfalls das Verhältnis von Produkt zu akkumuliertem Aufwand angibt, ähnlich, wenn man die Bilanzgrenzen der exergetischen Methode auch auf die Nutzungs- und Entsorgungsphase ausdehnt. Allerdings erfolgt die Berechnung des KEA auf der Basis des

ersten Hauptsatzes, während die exergetische Methode die Aussagen des zweiten Hauptsatzes mit einbezieht.

Die rein energetische Betrachtung des KEA lässt sich durch Verwendung der Exergie als Bewertungsgröße zur exergetischen Lebenszyklusanalyse (ELCA [COE02] bzw. LCEA [WAL02]) für Verfahren entwickeln. Bei dieser Herangehensweise werden alle ein- und austretenden Exergieströme während der Lebensdauer eines Verfahrens, die sich in Planungs- und Bauphase, Betriebsphase und Rückbauphase gliedern lässt, bilanziert. Dabei wird nicht nur der direkte Exergieaufwand, der in das Verfahren eingeht berücksichtigt, sondern auch der zusätzliche Aufwand für die Planungs- und Bauphase sowie die Rückbauphase als indirekter Exergieaufwand erfasst. Darüber hinaus lässt das Konzept eine Unterscheidung von erneuerbaren und nicht erneuerbaren Ressourcen zu, so dass auch in Hinblick auf die Nachhaltigkeit des Verfahrens Aussagen möglich sind [WAL97, WAL01b].

Eine Erweiterung dieser Vorgehensweise stellt die explizite Einbeziehung der Vorleistungen der Natur in die exergetische Bewertung dar. Diese als „Emergy analysis“ bzw. „Emergy evaluation“ bezeichnete Form der Bewertung betrachtet als äußere Bilanzgrenze die der Erde und folgt damit der Forderung des Sustainability-Konzeptes nach Integration der ökologischen Vorleistungen in die Bewertung. Somit wird neben der Effizienz des eigentlichen Verfahrens auch die Effizienz der ökologischen Prozesse, die eine Ressource bereitstellen, in die Bewertung einbezogen. Dies ist beispielsweise bei der Nutzung der Sonneneinstrahlung problemlos möglich, führt aber bei der Bewertung fossiler Energieträger wie beispielsweise Kohle, da z. B. der exergetische Wirkungsgrad der Inkohlung berechnet werden muss, zu Problemen bei der Bestimmung [HAU04a, HAU04b, ODU00a, ODU00b].

Die letztgenannte Methodik ist ebenso wie die in der Arbeit behandelte Bewertungsmethode den exergetischen Bewertungsmodellen zuzuordnen. Der Schwerpunkt liegt jedoch nicht in der Analyse des Verfahrens und der Einschätzung der Systemstruktur, sondern in der Bewertung der Vorleistungen. Diese können jedoch in die neu entwickelte Methode integriert werden, indem die Basise-xergiefaktoren der eintretenden Exergieströme nicht mit eins in das System fließen, sondern den Wirkungsgrad ihrer Erzeugung in vorgelagerten Verfahren oder die Effizienz der Stoff- und Energiewandlungen, die sie im ökologischen System durchlaufen haben, anzeigen.

3 Exergoökonomische Bewertung

Nach der Ableitung des exergetischen Bewertungsmodells wird in diesem Kapitel die exergoökonomische Bewertung diskutiert. Dazu werden zunächst alle auftretenden Kosten in einem System der Stoff- und Energiewandlung analysiert sowie ein Kostenmodell vorgestellt. Anschließend werden mit Hilfe des Konzeptes der Basiskosten exergoökonomische Kennzahlen für einzelne Bilanzräume sowie für strukturierte Systeme abgeleitet.

3.1 Kosten als ökonomische Bewertungsgröße

Die vorgestellte hierarchisch strukturierte exergetische Analyse beruht auf den Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik. Für eine umfassende Evaluierung eines Systems, wie beispielsweise einer kompletten Anlage der Stoff- und Energiewandlung, sind jedoch nicht nur exergetische Verluste zu berücksichtigen, die zu monetären Konsequenzen führen, sondern auch noch zusätzliche ökonomische Aufwendungen mit einzubeziehen. Damit verlässt man die Ebene der rein exergetischen Methode und erweitert sie um ökonomische Aspekte zur exergoökonomischen Bewertungsmethode. Die Verbindung von thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wird in der Fachliteratur vielfach als Thermoökonomie [FRA86, TSA93] bezeichnet. Falls die thermodynamische Zustandsgröße Exergie im Rahmen derartiger Betrachtungen verwendet wird, kann man auf den Begriff „Exergoökonomie“ [TSA96] zurückgreifen, wobei im englischsprachigen Raum auch die Bezeichnung Available Energy Costing [GAG80] verwendet wird. Die exergoökonomische Theorie wurde weltweit von einer Vielzahl von Autoren vorangetrieben, beispielhaft sollen die Arbeiten von BEJAN, TSATSARONIS, MORAN [BEJ96], FRATZSCHER [FRA86] und YANTOVSKIJ [YAN94] genannt werden. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen häufig Fragen der Kostenaufteilung mit Hilfe der Exergie [OTT69, SOR93]. Viele Problemstellungen der Exergoökonomie, wurden auf den so genannten ECOS-Konferenzen diskutiert [FRA99, TOR99, VAL02a, WAN02]. Für die thermodynamisch-ökonomische Bewertung wurde die Verwendung einer Matrixbetrachtung, die ausgehend von einer transponierten Produktionsmatrix den Prozess der Kostenentstehung untersucht, vorgeschlagen [VAL02b, VAL02c]. Ebenfalls wurde der Zusammenhang zwischen der thermodynamischen Zustandsgröße Exergie und dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung in der Literatur behandelt [FER01, WAL01a, WAL01b].

Darüber hinaus dokumentieren zahlreiche Beispiele die Anwendbarkeit dieser thermodynamisch-ökonomischen Methode. Die Palette der in der neueren Literatur beschriebenen Anwendungsfälle reicht von der Bewertung von Stoffwandlungsverfahren, wie zum Beispiel der exergoökonomischen Bewertung der Meerwasserentsalzung [BRE96] und der Schwefelsäureherstellung [GHE02],

über die Evaluierung einer Destillationsanlage [RIV02a] bis hin zur Untersuchung von Energieerzeugungsanlagen, wie beispielsweise einer Gasturbine [VER02] und eines GuD-Kraftwerkes [ARE02]. Ebenfalls wurden Prozesse zur Nutzung von Bioenergieträgern über die Vergasung [COT02, HEB03] untersucht und die Effektivität von Brennstoffzellen [ROY02] betrachtet.

Eine Lücke besteht jedoch in der Einbeziehung der hierarchischen Struktur in die exergoökonomische Analyse, so dass bis jetzt kein integriertes Kennzahlensystem für komplexe Systeme in der Literatur zu finden ist.

3.1.1 Definition

Die Erweiterung der exergetischen Analyse um ökonomische Aspekte erfordert eine entsprechende Größe, die eine derartige Analyse erlaubt. Im Rahmen der Arbeit wird dazu der Begriff der Kosten genutzt. Unter Kosten wird in der Ökonomie „der gesamte, in monetären Größen erfasste Güterverzehr bezeichnet, der zur Leistungserstellung erforderlich ist“ [HEN83] verstanden. Diese Definition ist sehr allgemein gehalten, für die Bewertungsaufgabe wird daher von folgender Definition ausgegangen: „Kosten sind der durch die betriebliche Leistungserstellung verursachte, mit Faktorpreisen bewertete Verzehr an Produktionsfaktoren“ [WIT93]. Hier wird explizit auf das Verursacherprinzip in der Kostenrechnung hingewiesen. Das Produktionsziel ist die Ursache für Kosten, die durch den Einsatz von Produktionsfaktoren entstehen, wobei unter dem Begriff Faktorverbrauch nachfolgend beispielsweise die eingesetzte Exergie verstanden wird. Der quantitative Verbrauch an Produktionsfaktoren wird mit Preisen bewertet und führt so zu den Kosten des Produktionsprozesses.

Die gesamten Kosten lassen sich im Hinblick auf verbrauchte Produktionsfaktoren katalogisieren und in folgende Kostenarten unterteilen:

- Material- und Energiekosten,
- Personalkosten,
- kalkulatorische Kosten,
- Betriebsmittelkosten und
- Kapitalkosten [WAT00].

Die Material- und Energiekosten umfassen alle Kosten, die für die im Produktionsprozess verbrauchten Einsatzstoffe anfallen. Im Rahmen der exergoökonomischen Analyse sind hierunter die Kosten für die Exergie der eingesetzten Rohstoffe, Hilfsstoffe und Vorprodukte zu verstehen. Die Personalkosten entstehen durch den zum Betrieb der Anlage notwendigen Arbeitseinsatz und

umfassen sowohl die Lohnsumme als auch die Sozialversicherungsbeiträge. Im Posten der kalkulatorischen Kosten werden alle Kosten subsumiert, die nicht zwangsläufig mit realen Geldströmen im Betrieb übereinstimmen, da hier der Werteverzehr gleichmäßig auf die Produktionsperioden verteilt wird. In der exergoökonomischen Betrachtung gehören hierzu vor allem die kalkulatorischen Abschreibungen, mit denen die Kosten für die Investitionen in Apparate und Anlagen möglichst gleichmäßig auf die Produktionsperioden verteilt werden. Darüber hinaus zählen zu den kalkulatorischen Kosten auch noch weitere Anteile wie die Verzinsung des betriebsnotwendigen Eigenkapitals und der Unternehmerlohn, die im nachfolgenden Modell aber nicht berücksichtigt werden. Zu den Betriebsmittelkosten gehören die Kosten der Betriebsbereitschaft, so dass hierunter beispielsweise die Kosten der Versicherung und Wartung der technischen Ausrüstung einer Anlage zusammengefasst werden. Schließlich werden noch Kapitalkosten betrachtet, die die Zinszahlungen für eingesetztes Fremdkapital enthalten.

3.1.2 Kostenrechnungssysteme

Neben der Einteilung in die genannten Kostenarten lassen sich die gesamten Kosten des Produktionsprozesses hinsichtlich ihrer Zuordenbarkeit auf die Produkte in Einzelkosten und Gemeinkosten unterscheiden. Da die Produkte alle Kosten des Herstellungsprozesses tragen, werden sie innerhalb der Kostenrechnung als Kostenträger bezeichnet. Daher werden die direkt den Produkten zuordenbaren Kosten als Kostenträgereinzelkosten bezeichnet und von den Kostenträgergemeinkosten, die unternehmensintern verrechnet und auf die Produkte umgelegt werden müssen, unterschieden. Diese interne Zuordnung geschieht durch eine Kostenstellen- und Kostenträgerrechnung, um die Kalkulation der Selbstkosten der Produktion und die Kostenverteilung auf Kostenträger zu ermöglichen [ZIM98].

Die Kostenträgergemeinkosten eines Produktionsprozesses lassen sich in Abhängigkeit von einer Einflussgröße, dem Kostentreiber, einteilen. Man unterscheidet hierbei variable Kosten, die bei Veränderung des Kostentreibers ebenfalls variieren, von fixen Kosten, die vom Kostentreiber unabhängig sind. Da diverse Kostentreiber als Unterscheidungsmerkmal ausgewählt werden können, ergibt sich eine Differenzierungsmöglichkeit nach Kostenrechnungssystemen, wie einige Beispiele in Tabelle 3.1 belegen [BUN96, LET98, WAT00].

Die traditionelle Vollkostenrechnung differenziert die anfallenden Kosten im Hinblick auf ihre Abhängigkeit vom Beschäftigungsniveau bzw. von der Kapazitätsauslastung einer Anlage. Die Kostenauflösung liefert eine Aufteilung in variable Kosten, die mit dem Beschäftigungsniveau schwanken, und fixe Kosten. Die Zuordnung der Gemeinkosten erfolgt über die Kostenstellenrechnung, wobei die Kostenstellen nach betriebsorganisatorischen Gesichtspunkten gebildet wer-

den [ZIM98]. Daher ist diese Kostenrechnung als personal- und organisationsorientiert einzuschätzen.

Ähnliches gilt auch für die Deckungsbeitragsrechnung, da auch hier in Abhängigkeit vom Beschäftigungsniveau die Einteilung in variable und fixe Kosten erfolgt. Das Ziel dieser Form der Kostenrechnung ist die Ermittlung eines Stückdeckungsbeitrages, der die Differenz zwischen dem Marktpreis und den variablen Kosten einer Produkteinheit beschreibt. Der ermittelte Betrag dient zur Deckung der fixen Kosten des Produktionsprozesses, die als Fixkostenblock auf die Kostenträger umgelegt werden, und zur Erzielung eines Gewinns. Bei dieser Rechnung ist eine stufenweise Fixkostendeckung, d. h. eine Zuordnung fixer Kosten auf unterschiedliche Hierarchieebenen möglich, so dass beispielsweise fixe Kosten des Gesamtsystems und Produktfixkosten auf unterschiedlichen Ebenen zugeordnet werden können [WAT00].

Tabelle 3.1: Übersicht Kostenrechnungssysteme

Kostenrechnungssystem	Kostentreiber
Vollkostenrechnung	Beschäftigungsniveau
Deckungsbeitragsrechnung	Beschäftigungsniveau
Umweltkostenrechnung	Abfallströme
Flusskostenrechnung	Material- und Energiefluss
Exergoökonomie	Exergiefluss

Ein anderer Ansatz wird mit der Umweltkostenrechnung verfolgt, da hier ausgehend vom Produktionsprozess die Umweltkosten, wie z. B. Entsorgungskosten für Abfälle oder Kosten für nachsorgende Umweltschutzmaßnahmen, auf die Produkte zugeordnet werden. Die Kostentreiber stellen hier die Abfallströme dar, die das Unternehmen verlassen und Entsorgungskosten verursachen. Durch die Suche nach den Ursachen dieser Abfallströme im Produktionsprozess wird auf eine Einteilung der Kostenstellen in Anlehnung an das Fließbild der Produktion orientiert [BUN96].

Noch einen Schritt weiter geht die Flusskostenrechnung, die konsequent am Material- und Energiefluss im Unternehmen ausgerichtet ist. Die Zielstellung, die Kostenrechnung anhand der Flussbeziehungen im System „Unternehmen“ auszurichten, lässt sich durch eine Untersuchung der auftretenden Kostenarten in durchschnittlichen produzierenden Unternehmen begründen. Die Analyse der Kostenverteilung ergab, dass die Materialkosten, d. h. die Kosten der Einsatzstoffe, einen

erheblich höheren Kostenanteil einnehmen als die Personalkosten, die als Verteilschlüssel in der Vollkostenrechnung dienen. Eine Verteilung wie folgt ist dabei charakteristisch:

- Material- und Energiekosten 56 %,
- Personalkosten 25 %,
- Abschreibungen, Mieten und Pachten 6 % sowie
- sonstige Kosten 13 % [LOE00].

Daher ist die Zuordnung von Gemeinkosten über das Beschäftigungsniveau insbesondere bei Anlagen der Stoff- und Energiewandlung kritikwürdig. Zudem werden die Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs auf den Produktionsprozess bei der traditionellen Kostenrechnung nicht explizit berücksichtigt, obwohl Material- und Energiekosten den größten Anteil an den Faktorkosten einnehmen.

Hier setzt die Flusskostenrechnung an, die die Material- und Energieströme als Kostentreiber ansieht. Zur Umsetzung dieser Art der Kostenrechnung benötigt man ein vollständiges Modell der Material- und Energieflüsse innerhalb des Produktionsprozesses, da die gesamte Kostenrechnung an den Strombeziehungen im System ausgerichtet ist. Die in das System eintretenden Ströme sind bereits mit Materialkosten belastet und müssen beim Durchlaufen des Systems die Bearbeitungskosten, die durch das Management des Materialflusses entstehen, tragen. Zusätzlich werden in diesem Modell Entsorgungskosten, die für die Beseitigung von Abfällen, Abwässern und Abwärme anfallen, berücksichtigt. Nachteilig ist, dass zur Beschreibung der Material- und Energieströme unterschiedliche physikalische Einheiten genutzt werden [LOE04].

Das exergoökonomische Kostenmodell baut grundsätzlich auf der Flusskostenrechnung auf, betrachtet aber einheitlich die Exergie der Stoff- und Energieströme als Kostentreiber. Zur Umlage der exergieunabhängigen Kosten des Systems wird in ähnlicher Weise wie bei der gestuften Deckungsbeitragsrechnung die Systemstruktur genutzt. Die detaillierte Modellbeschreibung ist Gegenstand der nachfolgenden Abschnitte.

3.1.3 Kostenarten in der exergoökonomischen Betrachtungsweise

Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben lassen sich die gesamten Kosten eines Produktionsprozesses katalogisieren und in Kostenarten einordnen. Im exergoökonomischen Modell werden die Kostenarten

- Exergiekosten,

- Investitionskosten und
- Personal- und Wartungskosten

unterschieden [FRA86, TSA93].

Da der Kostentreiber im Modell die Exergie ist, sind die Exergiekosten als variable Kosten anzusehen. Die Investitionskosten, die die Abschreibungen widerspiegeln, sowie die Personal- und Wartungskosten, die als „laufende Kosten“ [PIL91] zur Sicherung der Betriebsbereitschaft der Anlage betrachtet werden, sind nicht unmittelbar vom Kostentreiber Exergie abhängig und werden als Systemkosten zusammengefasst.

3.1.3.1 Exergiekosten

Die variablen Kosten, d. h. die Kosten der stationären Exergieströme, erhält man im Modell durch die Multiplikation des spezifischen Exergiepreises k mit dem Exergiestrom und der Benutzungsdauer τ_b , so dass Gleichung (3.1) einen Kostenstrom liefert:

$$\dot{K} = k\dot{E}\tau_b. \quad (3.1)$$

Zur Bestimmung der Exergiekosten eines Bilanzraumes müssen die Exergiekosten der Feedexergie bestimmt werden. Dazu verwendet man den spezifischen Exergiepreis k am Eintritt, der die Kosten je Exergieeinheit verdeutlicht und folglich die Dimension EUR/a aufweist. Die Benutzungsdauer gibt den Volllastbetrieb der betrachteten Einheit in Stunden pro Jahr an, so dass die nachstehende Gleichung die Exergiekosten der Feedexergie pro Jahr bestimmt:

$$\dot{K}_F = k_F\dot{E}_F\tau_b. \quad (3.2)$$

Die Bestimmung der Exergiekosten für Produktexergieströme oder Transitexergieströme erfolgt in analoger Weise.

3.1.3.2 Investitionskosten

Die Investitionskosten, die durch die Abschreibungen der Betriebsanlagen verursacht werden, zählen zu den Systemkosten einer Produktionsanlage. Die Investition in die Anlagenbestandteile, die in vorangegangenen Wirtschaftsperioden erstellt wurden, umfasst daher die Exergiekosten, Investitionskosten und die Personalkosten der erworbenen Güter. Zusätzlich enthalten die Investitionskosten im Modell die Finanzierungskosten der Investition. Um die Abnutzung der Investi-

ongüter und den Finanzierungsaufwand gleichmäßig über die Nutzungsdauer zu verteilen, wird die Investitionssumme I nach der Finanzierungsart in einen Eigenkapital- und in einen Fremdkapitalanteil zerlegt [KRU95]. Mit Hilfe der Eigenkapitalquote f_{EK} , die den Anteil des Eigenkapitals an der Investitionssumme widerspiegelt, werden Investitionskosten aus Eigenkapital und Investitionskosten durch eingesetztes Fremdkapital unterschieden:

$$K_I = f_{EK}K_I + (1 - f_{EK})K_I = \dot{K}_I^{EK} + \dot{K}_I^{FK}, \quad (3.3)$$

Das Ziel der gleichmäßigen Verteilung der Investitionsaufwendungen über die Nutzungsdauer erfordert eine gesonderte Behandlung des Eigen- und des Fremdkapitalanteils, um gleichmäßige Investitionskosten pro Jahr zu erhalten.

Für die gleichmäßige Verteilung der Investitionskosten aus Eigenkapital bietet sich die lineare Abschreibung des Investitionsgutes über die Nutzungsdauer N an, die den Werteverzehr des Produktionsfaktors modelliert. Der reziproke Wert der Nutzungsdauer ist der Abschreibungsfaktor z , so dass sich die Investitionskosten zu:

$$\dot{K}_I^{EK} = f_{EK}Iz, \quad (3.4)$$

ergeben. Die Berechnungsvorschrift spiegelt den kalkulatorischen Charakter der Abschreibungen wider, da hier nicht der tatsächliche Wertverlust, sondern die gleichmäßige Verteilung der Kosten der Investition im Vordergrund steht.

Bei der Berechnung der Investitionskosten mit Fremdkapital müssen die Zinszahlungen an die Gläubiger mit berücksichtigt werden. Um ebenfalls eine gleichmäßige Verteilung aller derartigen Kosten über die Nutzungsdauer zu erzielen, wird die annuitätische Verteilung der Fremdkapital-Investitionskosten gewählt:

$$K_I^{FK} = (1 - f_{EK})I \frac{i(1+i)^{\frac{1}{z}}}{(1+i)^{\frac{1}{z}} - 1}, \quad (3.5)$$

In der Berechnungsvorschrift ist der Zinssatz, der für die Überlassung des Fremdkapitals zu zahlen ist, enthalten. Die Anwendung der annuitätischen Abschreibung und Rückzahlung führt dazu, dass die Zinszahlungen über die Nutzungsperioden abnehmen und dafür die Tilgungsraten für das geliehene Kapital zunehmen.

Natürlich sind auch andere Modelle der Investitionskostenrechnung denkbar, wie zum Beispiel nichtlineare Abschreibungsmodelle oder Differenzen zwischen Nutzungsdauer und Rückzahlungs-

dauer [KUG90]. Diese Varianten haben aber den Nachteil, dass die Investitionskosten nicht gleichmäßig über die Nutzungsdauer verteilt werden und somit eine periodenspezifische exergoökonomische Betrachtung erfolgen müsste, was aber aufgrund der oben angegebenen Zielstellung nicht weiter verfolgt wird.

3.1.3.3 Personal- und Instandhaltungskosten

Der zweite Teil der Systemkosten wird durch die Kosten, die zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft anfallen, verursacht. Dazu zählen die Personalkosten, die sich aus dem Personalbedarf zum Betrieb der Anlage ergeben. Dazu wird die Personalanzahl a mit der jährlichen Bruttolohnsumme zuzüglich der Sozialversicherungsbeiträge der Arbeitgeberseite (Arbeitskosten L) multipliziert, um die Personalkosten pro Jahr zu modellieren.

Zur Sicherung der Betriebsbereitschaft fallen darüber hinaus noch Kosten der Wartung der Betriebsanlagen an [TSA93]. Zudem sind für den Betrieb des Produktionssystems Versicherungskosten anzusetzen. Beide Anteile sind von der Größe des Produktionssystems und von den getätigten Investitionen abhängig, so dass sie als prozentualer Aufschlagsatz zur Investitionssumme angenommen werden, wobei α als Wartungsaufschlag und β als Versicherungsaufschlag jeweils in Prozent pro Jahr angesetzt werden. Die Gleichung (3.6) fasst die Anteile der Personal- und Instandhaltungskosten zusammen:

$$\dot{K}_H = aL + (\alpha + \beta)I, \quad (3.6)$$

die ebenfalls als jährlich konstant modelliert sind, um periodenspezifische exergoökonomische Analysen zu vermeiden.

3.2 Exergoökonomisches Kostenmodell

Aufbauend auf den Flussbeziehungen in einem komplexen System, die in der exergetischen Analyse herausgearbeitet wurden und unter Einbeziehung der diskutierten Kostenarten wird nachfolgend ein Kostenrechnungsverfahren entwickelt, das die Kosten exergetisch auf die Kostenträger zuordnet und eine ökonomische Bewertung mit hierarchischen Kennzahlen ermöglicht.

3.2.1 Grundlegende Annahmen

Das exergoökonomische Kostenmodell ist eine Kostenrechnung, die auf den Flussbeziehungen von Exergieströmen beruht. Es wird davon ausgegangen, dass in den Verfahren der Stoff- und Energiewandlung die Exergie die Haupteinflussgröße der Prozesse darstellt und somit berechtigterweise als Kostentreiber im exergoökonomischen Kostenmodell angesehen werden kann.

Die Kostenträger im Modell sind die Exergieströme der gewünschten Endprodukte, die das zu untersuchende System verlassen. In einem komplexen System der Stoff- und Energiewandlung sind die wenigsten auftretenden Kosten als Kostenträger Einzelkosten zu charakterisieren, so dass die Behandlung der Kostenträger Gemeinkosten und deren Umlage auf die Kostenträger im Mittelpunkt des Kostenmodells steht.

Die nachfolgende Kostenrechnung geht davon aus, dass die vorgestellten Kostenarten Exergiekosten, Investitionskosten sowie Personal- und Wartungskosten die wesentlichen ökonomischen Einflussgrößen auf das zu bewertende System abbilden [WAT00]. Da diese Kosten in komplexen Systemen meist als Kostenträger Gemeinkosten charakterisierbar sind, müssen sie durch eine verursachungsgerechte Verrechnung den Kostenträgern zugeordnet werden. Dies erfolgt durch die Definition von hierarchisch gegliederten Bilanzräumen für die Energie- und Stoffwandlungsprozesse im System, die als Kostenstellen des Systems fungieren und bereits bei der exergetischen Analyse verwendet wurden. Für jeden Bilanzraum innerhalb des Systems lässt sich dabei nachfolgendes Bilanzschema verwenden:

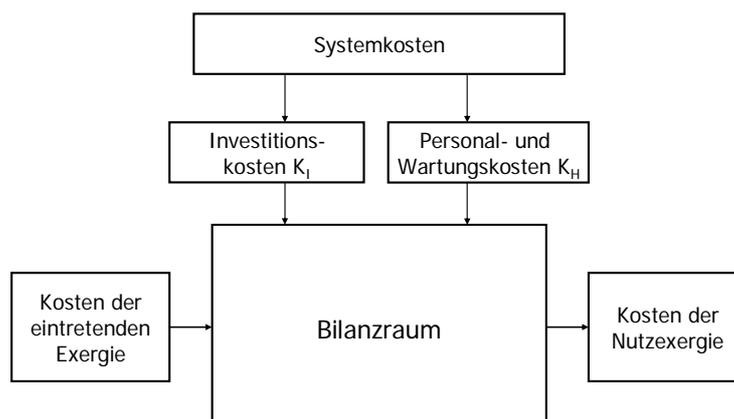


Abbildung 3.1: Exergoökonomisches Kostenmodell

Das Schema zeigt, dass die austretende Nutzexergie die drei Kostenarten, d. h. die Exergiekosten sowie die exergiestromunabhängigen Systemkosten des Bilanzraumes zu tragen hat.

Mit der Anwendung des Exergiekonzeptes in der Kostenrechnung ist die Konzentration auf thermodynamische Aspekte verbunden. Damit finden nur die Aspekte Eingang in die Bewertung, die durch die thermodynamischen Zustände Druck, Temperatur und Zusammensetzung beschrieben werden können. Hingegen finden andere Faktoren, die ebenfalls für eine ökonomische Einschätzung in Betracht kommen, keinen Eingang in die Rechnung, was beispielsweise die Gestaltung, die Farbe oder die Toxizität der Produkte betrifft. Folglich liefert das Modell eine Kostenrechnung und eine Kostenverteilung, die durch rein thermodynamische Faktoren bestimmt sind [BAL02].

Zur Bewertung sind speziell entwickelte Konzepte zum Umgang mit dem Kostentransit, der Definition einer Bezugsgröße sowie zur Kostenallokation bei Kuppelproduktion erforderlich, die in den nächsten Abschnitten diskutiert werden.

3.2.2 Kostenbilanz

Die exergoökonomische Kostenrechnung ist – wie andere Formen der Kostenrechnung auch – auf die Abgrenzung eines Bilanzraumes angewiesen. Für jeden Bilanzraum der exergetischen Analyse lässt sich in analoger Weise eine Kostenbilanz aufstellen, wobei die Input-Output-Betrachtung, wie sie in Abbildung 3.2 skizziert ist, die einfachste Möglichkeit darstellt.

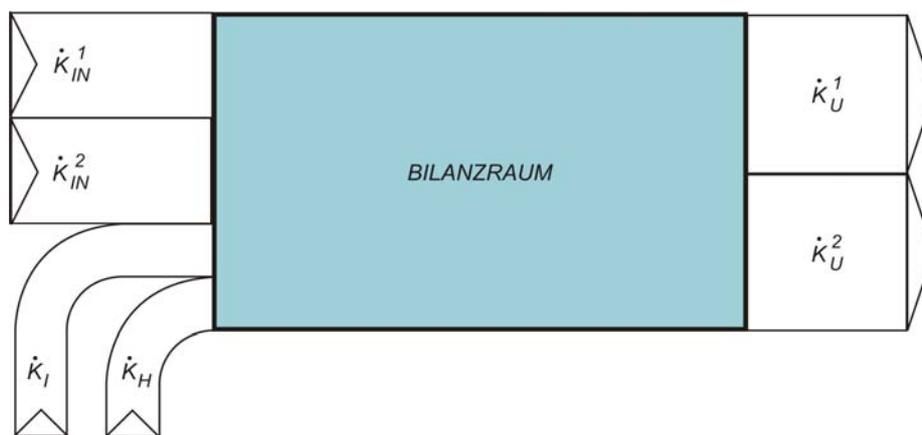


Abbildung 3.2: Kostenbilanz bei Input-Output-Betrachtung

Bei dieser Form der Kostenbilanzierung treten die gesamten Kosten der Exergieströme \dot{K}_{IN} in den Bilanzraum ein. Zusätzlich müssen die nutzbaren Exergieströme des Bilanzraumes die Systemkosten \dot{K}_I und \dot{K}_H , die in dem Bilanzraum anfallen, tragen. In dieser Weise erhält man die nachstehende Kostenbilanzgleichung für den definierten Bilanzraum:

$$\dot{K}_{IN} + \dot{K}_I + \dot{K}_H = \dot{K}_U. \quad (3.7)$$

Die Bilanz zeigt deutlich, dass die Systemkosten einen Anstieg der Exergiekosten beim Durchgang durch den Bilanzraum verursachen, die von den austretenden Nutzexergieströmen zu tragen sind.

Nachteilig ist, dass die praktische Umwandelbarkeit der eintretenden Exergieströme nicht berücksichtigt wird und damit die eintretenden Exergiekosten in den Bilanzraum nicht im Hinblick auf mögliche Exergietransite untersucht werden. Weiterhin ermöglicht diese einfache Kostenbilanz keine präzisen Aussagen über die Auswirkung der exergetischen Verluste im Bilanzraum, da hierzu eine zusätzliche Betrachtung der exergiespezifischen Kosten der eintretenden und austretenden Ströme erforderlich ist.

3.2.3 Kostentransit und Feedkostenfaktor

Die Berücksichtigung der Umwandelbarkeit der eintretenden Exergieströme in der Kostenbilanz erfordert die Definition eines Kostentransitstromes. Die Kosten des Exergietransits lassen sich mit dem spezifischen Exergiepreises k_{IN} des eintretenden Exergiestromes, dem Transitexergiestrom E_T und der jährlichen Benutzungsdauer τ_b bestimmen:

$$\dot{K}_T = k_{IN} \dot{E}_T \tau_b. \quad (3.8)$$

Der Kostentransit basiert auf der Differenzierung der eintretenden Exergie, die im Hinblick auf die Verbesserung der Aussagefähigkeit der Kennzahlen durchgeführt wird. Daher bleiben die spezifischen Exergiekosten der eintretenden Exergie, der Feedexergie und der Transitexergie konstant, so dass gilt:

$$k_{IN} = k_F = k_T. \quad (3.9)$$

Der transitive Anteil der variablen Kosten wird, ähnlich wie die Transitexergie, gedanklich um das zu bewertende Element herumgeführt, so dass in Analogie zur Exergiebilanz eine transitbereinigte Kostenbilanz für einen einfachen Bilanzraum aufgestellt werden kann. Dabei werden zunächst die eintretenden Exergiekosten in einen disponiblen Teil (Feedkosten K_f) und einen Transittteil (Transitkosten K_t) unterteilt:

$$\dot{K}_F + \dot{K}_T + \dot{K}_I + \dot{K}_H = \dot{K}_U. \quad (3.10)$$

Da die Transittkosten um das zu bewertende Element herumgeführt werden, lassen sich auch die Kosten K_U , die die nutzbaren Exergieströme zu tragen haben, in die Kosten der Produktexergie des Bilanzraumes und dem Kostentransit zerlegen:

$$\dot{K}_U = \dot{K}_P + \dot{K}_T. \quad (3.11)$$

Die Eliminierung des Kostentransits aus Gleichung (3.7) führt zur transitbereinigten Kostenbilanz eines Bilanzraumes:

$$\dot{K}_F + \dot{K}_I + \dot{K}_H = \dot{K}_P. \quad (3.12)$$

Wie die Kostenbilanz in Abbildung 3.3 zeigt, lässt der Kostentransit nur zwischen eintretenden Exergieströmen und nutzbaren Exergieströmen definieren, da nur die nutzbaren Exergieströme als Kostenträger einzuordnen sind.

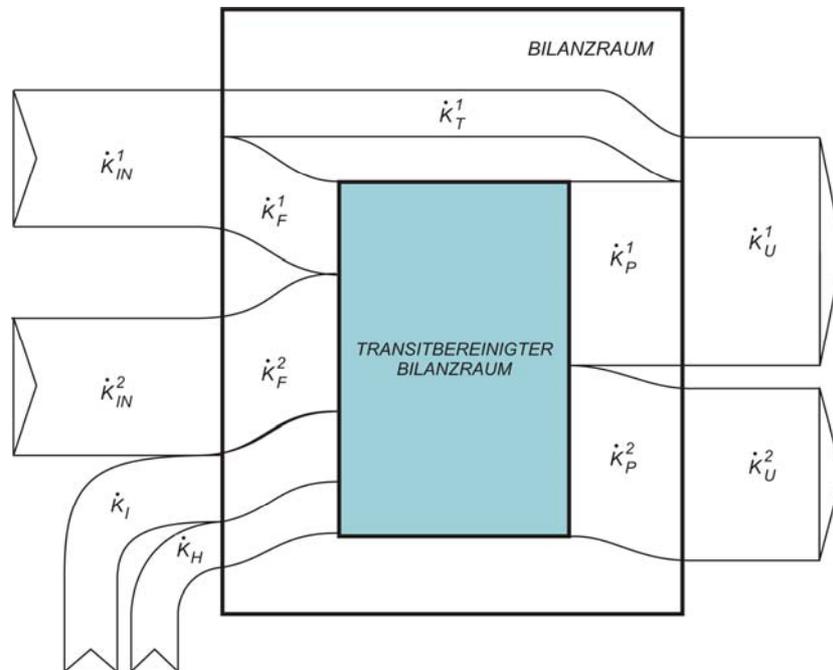


Abbildung 3.3: Kostenbilanz bei exergetischer Transitbereinigung

Die transitbereinigte Betrachtung hat den Vorteil, dass nur vom Bilanzraum zu verantwortende Kostenströme, nämlich die Kosten der im Bilanzraum umwandelbaren Feedexergie und die Systemkosten, in der Bilanz berücksichtigt werden. Alle anderen Kosten der Exergieströme, die durch den Bilanzraum nicht zu beeinflussen sind, finden keinen Eingang in die Bilanz. Zur Bestimmung des Exergietransits können die in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Transitvarianten genutzt werden. Die Anwendung der Transitbereinigung in der Kostenrechnung beeinflusst die Kostenverteilung im Bilanzraum bei gekoppelter Produktion von Exergieströmen. Dies wird in Abschnitt 3.2.6 diskutiert.

Mit der Berechnung des Kostentransits lässt sich in Analogie zum Feedfaktor der exergetischen Bewertung ein Feedkostenfaktor angeben. Die Kennzahl setzt die Feedexergiekosten in das Verhältnis zu den gesamten Exergiekosten:

$$\varphi_K = \frac{\dot{K}_F}{\dot{K}_{IN}}, \quad (3.13)$$

und verdeutlicht den Effekt der Transitbereinigung auf die Kostenrechnung.

Neben der Transitbereinigung ist in der exergoökonomischen Kostenrechnung die Definition einer Bezugsgröße erforderlich, um die Kostenentstehung genauer zu analysieren.

3.2.4 Basiskosten

Die exergoökonomische Methode benötigt für die Bewertungsaufgabe eine Bezugsgröße, die vergleichbar mit dem Konstrukt des reversiblen Prozesses der exergetischen Analyse ist, der den minimalen exergetischen Aufwand zur Erzeugung eines Produktes beschreibt. In ähnlicher Weise lassen sich auch im Rahmen der Kostenbetrachtung für einen Bilanzraum minimale Kosten für die Erzeugung des Produktexergiestromes definieren. Dieser Grenzfall ist durch eine Erweiterung des reversiblen Grenzfall der exergetischen Analyse gekennzeichnet: Neben der reversiblen Prozessführung muss auch die Forderung der Abwesenheit von Systemkosten erfüllt werden. Dies stellt den exergoökonomischen Idealfall dar und hat die Konsequenz, dass hierbei die Exergiekosten der eintretenden Ströme identisch mit den Exergiekosten der austretenden Ströme sind, da weder Kosten durch exergetische Verluste noch durch Investitions- sowie Personal- und Wartungskosten auftreten. Dieser theoretische Grenzfall bestimmt die thermodynamisch begründeten Mindestkosten, die im Folgenden als Basiskosten bezeichnet werden.

Zunächst sollen die Basiskosten anhand eines einfachen Bilanzraumes ohne Kuppelproduktion erläutert werden. Die Basiskosten der eintretenden Feedexergie stimmen für die Betrachtung eines einzelnen Bilanzraumes mit den Exergiekosten des Feedstromes nach Gleichung (3.2) überein, da aus der Perspektive des Prozesses im Bilanzraum am Bilanzraumeintritt noch keine Kosten durch Exergieverluste und durch Systemkosten abgefallen sind. Die Basiskosten des Produktstromes errechnen sich unter der Annahme eines reversiblen Prozessablaufes ohne Systemkosten. Folglich können diese Kosten unter Nutzung des oben definierten Wirkungsgrades nach Gleichung (2.25) und den Exergiekosten des Feedstromes bestimmt werden, während die Investitionskosten sowie die Personal- und Wartungskosten im Gegensatz zur Kostenbilanz nach Gleichung (3.12) unberücksichtigt bleiben:

$$\dot{K}_p^B = \eta \dot{K}_F = \eta k_F \dot{E}_F \tau_b. \quad (3.14)$$

Das Einsetzen der Wirkungsgraddefinition führt zu:

$$\dot{K}_p^B = k_F \dot{E}_p \tau_b. \quad (3.15)$$

Diese Berechnungsvorschrift verdeutlicht die Forderung nach Reversibilität und die Bedeutung des Exergiepreises der Feedexergie. Die so errechneten Basiskosten des Produktstromes sind ein Maß für den naturwissenschaftlich begründeten Mindestaufwand, der durch die Hauptsätze der Thermodynamik vorgegeben ist.

3.2.5 Zusatzkosten

Alle Kosten, die über den Betrag der Basiskosten hinaus anfallen, sind aus exergoökonomischer Sicht zusätzliche Kosten des Bilanzraumes, die sich durch technisch-technologische Verbesserungen und Weiterentwicklungen prinzipiell vermeiden oder zumindest vermindern lassen. Daher werden diese Kosten als Zusatzkosten des Bilanzraumes bezeichnet. Die Zusatzkosten können in die Anteile:

- Exergieverlustkosten K_{D+L} ,
- Investitionskosten K_I und
- Personal- und Wartungskosten K_H .

gegliedert werden.

Während sich die Systemkosten nach den Gleichungen (3.3) und (3.6) bestimmen lassen, müssen die Exergieverlustkosten K_{D+L} gesondert berechnet werden. Dieser Kostenanteil spiegelt die Kosten wider, die durch die inneren und äußeren Exergieverluste des Bilanzraumes entstehen. Die Exergieverlustkosten werden mit Hilfe des Verlustgrades der Prozesse und der Feedexergiekosten bestimmt:

$$\dot{K}_{D+L} = \varepsilon k_F \dot{E}_F \tau_b = (\varepsilon_D + \varepsilon_L) k_F \dot{E}_F \tau_b, \quad (3.16)$$

Es zeigt sich, dass jede Abweichung vom reversiblen Prozess zu Zusatzkosten führt, da ein Teil der eingesetzten Exergie, die mit Feed-Kosten belastet ist, entwertet wird. Die erzeugte Produktexergie ist durch die Exergieverluste im Bilanzraum kleiner als die Feedexergie, was den Anstieg der spezi-

fischen Exergiekosten k_p im Vergleich zu den spezifischen Kosten k_f der Feedexergie im Bilanzraumes begründet.

Ein ähnlicher Kostenanstieg wird durch die Investitionskosten K_I und die Personal- und Wartungskosten K_H verursacht. Da alle Zusatzkosten bei der Erzeugung der Produktexergie entstehen, muss diese als Kostenträger des Bilanzraums die gesamten Zusatzkosten:

$$\dot{K}_p^{A^*} = \dot{K}_{D+L} + \dot{K}_I + \dot{K}_H \quad (3.17)$$

tragen. Mit den Gleichungen (3.15) und (3.17) lassen sich die Gesamtkosten der Produktexergie als Summe zweier Komponenten angeben:

$$\dot{K}_p = \dot{K}_p^B + \dot{K}_p^{A^*} . \quad (3.18)$$

Das Zerlegen der Gesamtkosten der Prozesse im Bilanzraum in Basis- und Zusatzkosten ist die Voraussetzung für eine thermodynamisch-ökonomische Bewertung.

Die definierten Zusatzkosten stehen im Mittelpunkt der exergoökonomischen Analyse, da sie das Potential für Verbesserungen der ökonomischen Effektivität darstellen. Die Zielstellung ist aus exergoökonomischen Blickwinkel die Verringerung der gesamten Zusatzkosten, wobei die einzelnen Anteile der Zusatzkosten auch indirekte Proportionalitäten aufweisen können. So ist beispielsweise die Senkung der Triebkraftdifferenzen und damit der Exergieverlustkosten meist mit einem erhöhten apparativen Aufwand verbunden, der zu höheren Investitionskosten führt [FRA86]. Mit Hilfe des exergoökonomischen Ansatzes soll jedoch nicht vorrangig die Optimierung zwischen einzelnen Zusatzkostenanteilen realisiert werden, vielmehr wird mit der Methode das theoretische Potential einer Kostensenkung ermittelt und die Verbesserung der ökonomischen Effizienz des im Bilanzraum stattfindenden Prozesses in Richtung des Kostenminimums angestrebt.

3.2.6 Kostenallokation bei Kuppelproduktion

Die bisherige Diskussion beschränkte sich auf die Bestimmung von Basis- und Zusatzkosten für den Fall, dass ein Produktexergiestrom erzeugt wird. Gerade im Bereich der Stoff- und Energie-wandlung ist jedoch die gekoppelte Erzeugung von Produkten häufig anzutreffen. Die Produktströme des Bilanzraumes, die zusätzlich als Haupt- oder Nebenprodukte klassifiziert werden können, haben grundsätzlich die gesamten auftretenden Kosten zu tragen. Zur Verteilung der Kosten auf die Produkte muss eine nachvollziehbare Allokationsmethode ausgewählt werden.

In der betriebswirtschaftlichen Literatur wird meist davon ausgegangen, dass bei komplexen Verfahren das grundlegende Prinzip der Kostenverursachung nicht angewandt werden kann [ZIM98]. Daher wird eine Verteilung nach dem Tragfähigkeitsprinzip vorgeschlagen, die nur unter Einbeziehung von Marktpreisen realisiert werden kann. Eine Methode des Tragfähigkeitsprinzips, die zur Kostenverteilung verwendet wird, ist die Subtraktionsmethode (auch: Restwertrechnung). Dabei werden die auf dem Markt erzielbaren Erlöse für die Nebenprodukte von den Gesamtkosten subtrahiert und nur der Restbetrag dem Hauptprodukt zugeordnet [ZIM98]. Für die exergoökonomische Methode ist diese Vorgehensweise kein gangbarer Weg, da hier gerade die Kostenentstehung im Verfahren analysiert werden soll, ohne auf die Erlössituation am Markt Rücksicht nehmen zu müssen.

Wesentlich sinnvoller ist es, naturgesetzliche Verteilungsschlüssel einzusetzen. Den thermodynamischen Aufteilungsmethoden ist die energetische Kostenverteilung zuzuordnen. Es handelt sich dabei jedoch um eine Aufteilung nach dem Ersten Hauptsatz der Thermodynamik, die den oben erwähnten Zusammenhang zwischen energetischer Qualität und ökonomischem Wert unberücksichtigt lässt. Daher ist es nahe liegend, im Rahmen einer exergoökonomischen Analyse die Aufteilung nach der Exergie der Produkte vorzunehmen. Die Basiskosten der Produktexergien sind bei gegebenen ökonomischen Rahmenbedingungen durch den exergetischen Mindestaufwand und dem Exergiepreis naturgesetzlich determiniert. Dieser thermodynamische Aufteilungsschlüssel wird auch auf die Allokation der Zusatzkosten, die über den Mindestaufwand hinaus anfallen, übertragen.

Die exergetische Kostenaufteilung vermeidet so die Nachteile der betriebswirtschaftlichen wie der energetischen Methode. In der vorliegenden Arbeit wird auch in der Kostenrechnung nicht zwischen Haupt- und Nebenprodukt unterschieden. Entscheidend ist nur die Aufteilung in Produkte und Abprodukte eines Prozesses, so dass die Erzeugungskosten aller entstehenden Produkte fokussiert werden. Auch in der entsprechenden Literatur [OTT69, PIL91, VAL03b] ist eine exergetische Kostenaufteilung untersucht worden, was zahlreiche Anwendungsbeispiele [BRE96, NAR02 u.a.] belegen.

Einen bedeutenden Einfluss auf die Kostenverteilung kommt der exergetischen Transitbereinigung zu, was durch die Wahl der Exergie als Verteilungsschlüssel begründet ist [SOR93]. Da die Transitexergie der Ströme gedanklich um den Bilanzraum geführt werden, müssen die Transitzkosten nicht aufgeteilt werden. Vielmehr ist dann nur die Verteilung der Feedexergiekosten und der Systemkosten Gegenstand der exergetischen Kostenaufteilung bei der Kuppelproduktion.

Die grundsätzliche Bedeutung der Transitbereinigung in der Kostenrechnung soll anhand des bereits in Kapitel 2.3.2 diskutierten Gegenstrom-Wärmeübertragers verdeutlicht werden, dessen

exergetischer Bilanzraum in Abbildung 2.4 skizziert wurde. Bei der Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die Exergie des heißen Mediums in nachfolgenden Elementen des Systems noch genutzt werden kann. Durch die Wahl einer Variante der exergetischen Transitbereinigung werden vom Wärmeübertrager nicht umwandelbare Exergieströme gedanklich um den Bilanzraum geführt, so dass sowohl für das heiße Medium E_1 als auch für das kalte Medium E_3 ein entsprechender Transitexergiestrom definiert werden kann. Unter Verwendung von Kostenströmen zur Beschreibung der ökonomischen Situation ergibt sich folgendes Bild des Bilanzraumes:

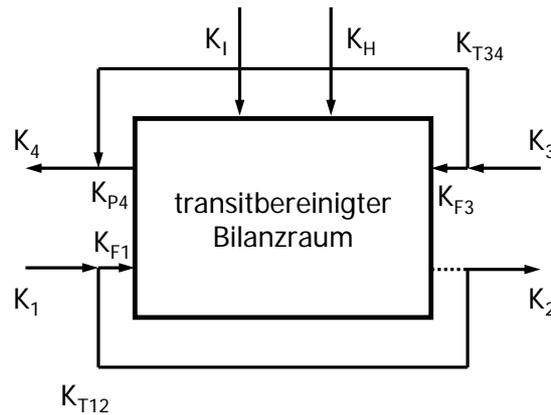


Abbildung 3.4: Transitbereinigte Kostenbilanz um einen Wärmeübertrager

Falls die exergetische Transitbereinigung nicht angewandt wird, stellt sich das Problem der Kostenaufteilung auf die zwei austretenden Exergieströme E_2 und E_4 . In diesem Fall müssen beide austretenden nutzbaren Exergieströme die gesamten Kosten des Wärmeübertragungsprozesses tragen, so dass sich folgende Kostenbilanz ergibt:

$$\dot{K}_2 + \dot{K}_4 = \dot{K}_1 + \dot{K}_3 + \dot{K}_I + \dot{K}_H. \quad (3.19)$$

Die exergetische Kostenaufteilung liefert für die Kosten des austretenden heißen Stromes K_2 :

$$\dot{K}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_U} (\dot{K}_1 + \dot{K}_3 + \dot{K}_I + \dot{K}_H). \quad (3.20)$$

Die Gleichung verdeutlicht, dass der heiße Strom, obwohl er im Wärmeübertragungsprozess lediglich Exergie abgibt, mit Kosten belastet wird. Der spezifische Exergiepreis des heißen Stromes errechnet sich aus den Gesamtkosten, die auf die gesamte austretende Nutzexergie umgelegt werden, und ist daher identisch mit dem Exergiepreis des austretenden kalten Stromes:

$$k_2 = k_4 = \frac{\dot{K}_1 + \dot{K}_3 + \dot{K}_I + \dot{K}_H}{\dot{E}_U \tau_b}, \quad (3.21)$$

Durch die exergetische Kostenverteilung im unbereinigten Fall wird der heiße Strom mit einem Anteil der Zusatzkosten des Prozesses (Exergieverlustkosten, Investitionskosten, Personal- und Wartungskosten) belastet. Dies führt zu einem Anstieg des spezifischen Exergiepreises, obwohl der heiße Strom die Exergie für den Prozess liefert, dessen Ziel die Erwärmung des kalten Stromes ist. Um diese Fehlallokation von Kosten zu vermeiden, ist es notwendig, das Konzept der exergetischen Transitbereinigung in der Kostenrechnung anzuwenden.

Die Vorteile der Transitbereinigung, die oben bereits diskutiert wurden, zeigen sich auch bei der Kostenverteilung. Falls die wandlungsorientierte Variante der Transitbereinigung angewandt wird, erhält man folgende transitbereinigte Kostenbilanz, die auch aus Abbildung 3.4 ableitbar ist:

$$\dot{K}_{P4} = \dot{K}_{F1} + \dot{K}_{F3} + \dot{K}_I + \dot{K}_H. \quad (3.22)$$

Es zeigt sich, dass durch die Transitbereinigung in diesem Fall das Problem der Kostenverteilung vermieden wird. Alle Kosten des Prozesses werden auf die Produktexergie, d. h. der Exergiezuwachs des kalten Stromes durch dessen Erwärmung, umgelegt. Dies führt dazu, dass der spezifische Exergiepreis des kalten Stromes durch die Zusatzkosten des Wärmeübertragungsprozesses ansteigt:

$$k_4 = \frac{\dot{K}_{F1} + \dot{K}_{F3} + \dot{K}_I + \dot{K}_H}{\dot{E}_{P4} \tau_b}. \quad (3.23)$$

Im Gegensatz dazu bleibt der spezifische Exergiepreis des heißen Stromes konstant, da die nicht umgewandelte Exergie dieses Stromes als Kostentransit gedanklich um den Bilanzraum geführt wird:

$$k_2 = k_1 = k_{T12}. \quad (3.24)$$

Der heiße Strom wird in diesem Fall nicht mit Kosten des Prozesses belastet. Da der Wärmeübertragungsprozess die Aufheizung des kalten Stromes als Aufgabe hat, ist es nachvollziehbar, alle damit verbundenen ökonomischen Aufwendungen der erzeugten Produktexergie zuzuordnen. Diese Vorgehensweise richtet sich außerdem nach dem Verursachungsprinzip in der Kostenrechnung.

Darüber hinaus wird auch in der entsprechenden Literatur die Auswirkung der Transitbereinigung diskutiert [BRO94, SOR93]. BRODYANSKY betrachtet ebenfalls eine transitbereinigte Kostenbilanz und ordnet die Kosten der Exergieverluste den „useful effects“ [BRO94] zu, wie er die Produktexergie bezeichnet.

Daher wird im Rahmen der Arbeit eine exergetische Kostenaufteilung unter Einbeziehung der Transitbereinigung verwendet, um den Kostenfluss zu modellieren und Bewertungskennzahlen abzuleiten.

3.3 Exergoökonomische Kennzahlen

Durch die Entwicklung des Basiskosten-Ansatzes steht eine Bezugsgröße für die exergoökonomische Bewertung von Prozessen zur Verfügung. Unter Einbeziehung der Aussagen zur Kostenallokation bei Kuppelproduktionen werden in Analogie zur exergetischen Bewertung dimensionslose Kennzahlen gebildet, die einen Vergleich verschiedenster Prozessvarianten im Bilanzraum erlauben.

3.3.1 Kostengrad

Eine Möglichkeit, die exergoökonomische Effektivität der Stoff- und Energiewandlung in einem Bilanzraum zu beurteilen, ist der Vergleich zwischen den Basiskosten der Produktexergieströme und den gesamten Kosten des Bilanzraumes. Das Verhältnis der Basiskosten der Produktexergien zu den Feedexergiekosten und den Systemkosten wird als Kostengrad bezeichnet:

$$\eta_K = \frac{\eta \dot{K}_F}{\dot{K}_F + \dot{K}_I + \dot{K}_H} = \frac{\dot{K}_P^B}{\dot{K}_F + \dot{K}_I + \dot{K}_H}. \quad (3.25)$$

Die Kennzahl gibt an, welcher Teil der Gesamtkosten eines Bilanzraumes naturgesetzlich bedingt anfällt. Der Kostengrad nimmt für den exergoökonomischen Idealprozess den Wert eins an, da in diesem Fall der Wirkungsgrad eins ist und keine Systemkosten anfallen. Alle Abweichungen von diesem Idealfall führen zu Kostengraden kleiner als Eins.

3.3.2 Zusatzkostengrad

Eine weitere Möglichkeit der Bewertung bietet der Zusatzkostengrad, der die gesamten Zusatzkosten eines Bilanzraumes zu den eintretenden Gesamtkosten ins Verhältnis setzt. Die Gesamtkosten setzen sich aus den Feedexergiekosten und den Systemkosten zusammen. Damit erhält man das Komplement zum Kostengrad:

$$\varepsilon_K = \frac{\varepsilon \dot{K}_F + \dot{K}_I + \dot{K}_H}{\dot{K}_F + \dot{K}_I + \dot{K}_H} = \frac{\dot{K}_P^{A^*}}{\dot{K}_F + \dot{K}_I + \dot{K}_H}. \quad (3.26)$$

Für den exergoökonomischen idealen Bilanzraum, d. h. im Fall einer theoretisch reversiblen Stoff- oder Energiewandlung ohne zusätzliche Kosten für Investitionen oder Personal und Wartung, ist der Zusatzkostengrad gleich null. Dieser Fall ist zugleich die anzustrebende Zielstellung für jede Weiterentwicklung des betrachteten Prozesses, da die Kombination aus Effektivitätssteigerung und gleichzeitiger Senkung der Systemkosten die vorteilhafteste Variante der Prozessverbesserung ist. Jede Abweichung vom beschriebenen Idealprozess führt zu zusätzlichen Kosten, die sich in einem von Null verschiedenen Zusatzkostengrad widerspiegeln.

Da sich der Zusatzkostengrad aus den drei oben beschriebenen Zusatzkostenanteilen zusammensetzt, lassen sich drei anteilsspezifische Zusatzkostengrade definieren, um die Ursachen für den Kostenanstieg im Bilanzraum herauszuarbeiten und Kostensenkungspotentiale zu bestimmen. Somit lässt sich der Zusatzkostengrad durch interne und äußere Exergieverluste

$$\varepsilon_{K,D+L} = \frac{\varepsilon \dot{K}_F}{\dot{K}_F + \dot{K}_I + \dot{K}_H} = \frac{\dot{K}_{D+L}}{\dot{K}_F + \dot{K}_I + \dot{K}_H} \quad (3.27)$$

der Zusatzkostengrad durch Abschreibungen auf Investitionen

$$\varepsilon_{K,I} = \frac{\dot{K}_I}{\dot{K}_F + \dot{K}_I + \dot{K}_H} \quad (3.28)$$

und der Zusatzkostengrad durch Personal und Wartung

$$\varepsilon_{K,H} = \frac{\dot{K}_H}{\dot{K}_F + \dot{K}_I + \dot{K}_H} \quad (3.29)$$

formulieren.

Diese drei Anteile am Zusatzkostengrad lassen sich in der nachstehenden Abbildung 3.5 anschaulich darstellen. Das Dreieckdiagramm der anteiligen Zusatzkostengrade, dessen Achsen den Wertebereich von null bis zum Zusatzkostengrad abdecken, zeigt die Ursachen für den Kostenanstieg auf und gibt Ansatzpunkte für Kostensenkungen an. Mit dieser Darstellungsform lässt sich sehr gut die Verteilung der Zusatzkosten untersuchen, jedoch ist ein Vergleich unterschiedlicher Bilanzräume und die Einordnung von alternativen Prozessen nur schwer möglich.

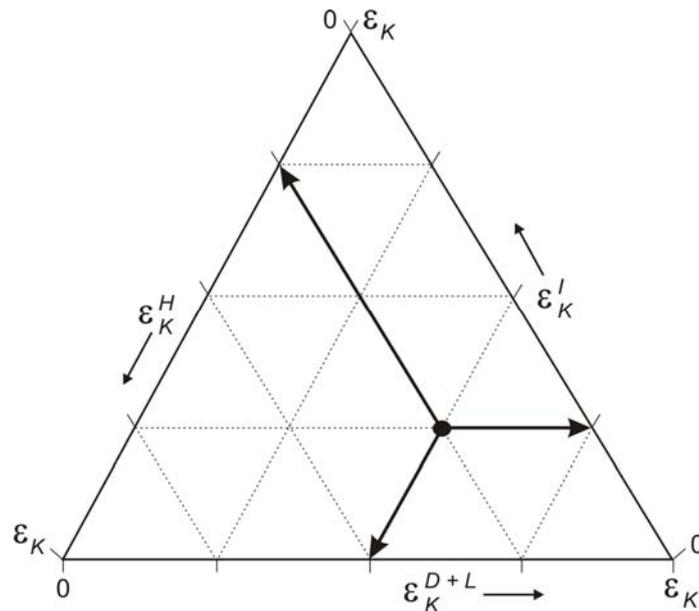


Abbildung 3.5: Dreieckdiagramm der Zusatzkostengradanteile

Die Nachteile des Dreieckdiagramms durch die von Null bis zum Zusatzkostengrad normierte Achse lässt sich durch die Pyramidendarstellung der Zusatzkostenanteile, wie sie in Abbildung 3.6 skizziert ist, umgehen. In der Grundfläche der Pyramide werden alle Prozesse mit einem Zusatzkostengrad von eins eingeordnet, während die Spitze der Pyramide den exergoökonomischen Idealprozess mit dem Zusatzkostengrad von null abbildet. Folglich sind alle Prozesse umso effektiver, je näher sie sich an der Spitze der Pyramide befinden, da die Höhe der Pyramide durch den Zusatzkostengrad angegeben wird. Die Dreieckdiagramme wie in Abbildung 3.5 ergeben sich durch einen Schnitt durch die Pyramide parallel zur Grundfläche auf der Höhe des Zusatzkostengrades des untersuchten Bilanzraumes.

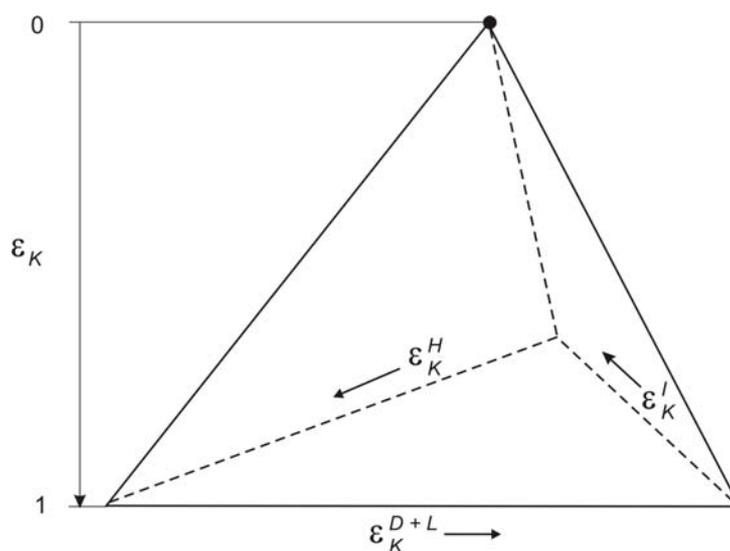


Abbildung 3.6: Pyramide der Zusatzkostengradanteile

und durch Personal- und Wartungskosten, die Wirtschaftlichkeit des untersuchten Bilanzraumes, wohingegen in Sektor F die Personal- und Wartungskosten allein dominieren.

3.3.3 Exergoökonomische Ähnlichkeitskennzahl

Ausgehend von der Tatsache, dass zur Herstellung der Investitionsgüter, die für ein Verfahren benötigt werden, ebenfalls Exergie aufgewandt werden muss, lässt sich eine weitere Kennzahl angeben. Da die Investitionsgüter dann ebenfalls vom Exergiepreis abhängig sind, wurde von PAUER das Verhältnis von Investitionskosten zu Exergiekosten als thermoökonomische Ähnlichkeitskennzahl vorgeschlagen [PAU70]:

$$Pa = \frac{\dot{K}_I}{\dot{K}_{IN}}, \quad (3.30)$$

so dass ein Zusammenhang zwischen variablen Exergiekosten und fixen Investitionskosten mit der PAUER-Zahl beschrieben wird. Im Rahmen der Arbeit werden neben den Investitionskosten auch die Personal- und Wartungskosten berücksichtigt und das Konzept der exergetischen Transitbereinigung angewandt. Daher ist es zweckmäßig, eine modifizierte PAUER-Zahl Pa^* zu definieren, die die Systemkosten des Elements auf die Feedexergiekosten bezieht:

$$Pa^* = \frac{\dot{K}_I + \dot{K}_H}{\dot{K}_F}. \quad (3.31)$$

Auch für den Betrieb der Anlage, hier ausgedrückt durch die Personal- und Wartungskosten, ist ein Einsatz von Exergie erforderlich, so dass der Zusammenhang zwischen Systemkosten und Feedkosten mit Hilfe der modifizierten PAUER-Zahl hergestellt werden kann. Der Wertebereich dieser exergoökonomischen Ähnlichkeitskennzahl lässt eine Interpretation der Bedeutung der Systemkosten eines Elementes im Verhältnis zu den Kosten der wandelbaren Exergie zu. Für PAUER-Zahlen kleiner als eins sind die Systemkosten weniger bedeutsam als die Exergiekosten im betrachteten Bilanzraum.

Somit steht eine alternative Darstellungsform der exergoökonomischen Situation mit Hilfe eines Verlustgrad – PAUER-Zahl – Diagramms zu Verfügung, das den Zusammenhang zwischen exergetischer Effektivität und dem Verhältnis von System- zu Exergiekosten beschreibt.

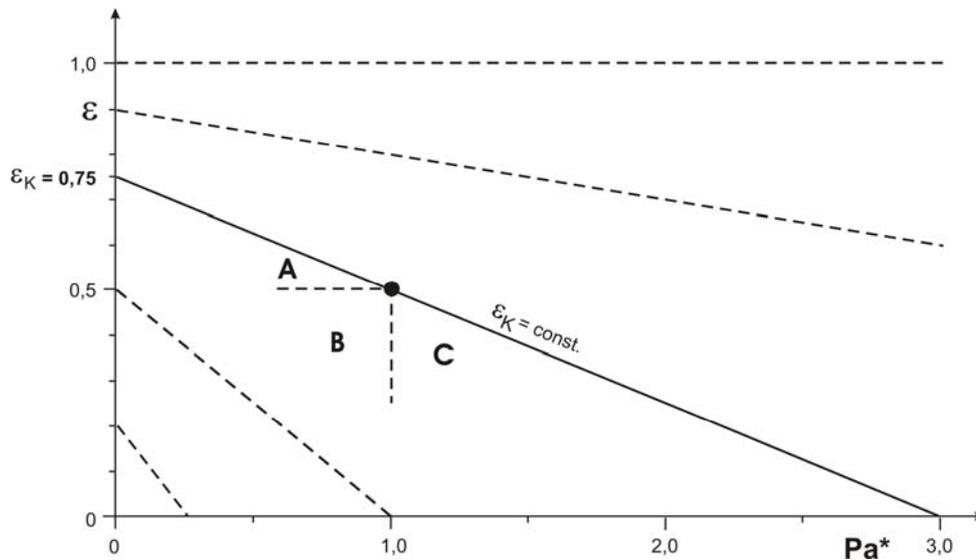


Abbildung 3.8: ε - Pa^* -Diagramm

Mit Hilfe der modifizierten PAUER-Zahl lässt sich jeder Prozess in einem solchen ε - Pa^* -Diagramm, wie es in Abbildung 3.8 angegeben ist, darstellen. Das Diagramm zeigt anschaulich den Zusammenhang zwischen exergetischer Effektivität über den Verlustgrad und den Systemkosten mit der PAUER-Zahl Pa^* . Im Diagramm können Linien gleicher Zusatzkostengrade, wie es beispielhaft für $\varepsilon_K = 0,75$ ausgeführt ist, eingezeichnet werden, die Prozesse mit gleicher exergoökonomischer Effektivität verbinden. Diese Darstellung ermöglicht wie die Pyramidendarstellung den Vergleich von Prozessen untereinander, der Schwerpunkt ist hier jedoch, die Entstehung der Zusatzkosten zu verdeutlichen und Ansatzpunkte für eine Prozessverbesserung aufzuzeigen. Für den Fall eines Prozesses, der durch einen exergetischen Verlustgrad von 0,5 und eine PAUER-Zahl von 1 gekennzeichnet ist, sind mögliche Entwicklungsrichtungen für exergoökonomische Prozessverbesserungen durch die Sektoren A, B und C angegeben. Alle Prozessalternativen, die sich durch höhere Kosten als die Ausgangsvariante auszeichnen, liegen im betrachteten Fall oberhalb der Linie $\varepsilon_K = 0,75$ im Bereich höherer Zusatzkostengrade und sind folglich ökonomisch unvorteilhaft. Eine Entwicklung in Richtung der angegebenen Sektoren zeichnet sich durch eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Prozesses aus, da der exergoökonomische Idealprozess im Ursprung des Diagramms zu lokalisieren ist. Mögliche Prozessalternativen, die sich im Sektor A befinden, erreichen eine verbesserte Wirtschaftlichkeit, da die größeren Exergieverluste durch sinkende Systemkosten überkompensiert werden. Ebenfalls ökonomisch vorteilhaft sind Prozessvarianten, die sich in Sektor C befinden, wo zwar höhere Systemkosten anfallen, diese aber durch eine Verbesserung der exergetischen Effizienz zu wesentlich geringeren Exergieverlustkosten und damit geringeren Gesamtkosten führen. Besonders vorteilhaft erscheinen Verbesserungen, die zu in Sektor B gelegenen Prozessvarianten führen, da hier sowohl eine Senkung der Systemkosten als auch eine Senkung

der Exergiekosten realisiert werden. Dies ist der Bereich, in dem Prozessalternativen zu finden sind, die durch einen hohen Grad an ingenieurwissenschaftlicher Innovation exergoökonomisch verbessert wurden.

3.4 Exergoökonomische Bewertung strukturierter Systeme

Die bisher getroffenen Aussagen und Definitionen galten für einen einfachen Bilanzraum, ohne auf dessen Einbindung in ein komplexes System einzugehen. Die vorgestellten transitbereinigten Bewertungskennzahlen lassen sich unter dem Blickwinkel eines Gesamtsystems und dessen Struktur zu thermodynamisch begründbaren Kennzahlen zusammenfassen und ermöglichen eine umfassende exergetische Bewertung der im System auftretenden Stoffwandlungsprozesse.

3.4.1 Besonderheiten der Bewertung

Für eine ökonomische Bewertung komplexer Systeme der Stoff- und Energiewandlung müssen, wie bereits im Rahmen der exergetischen Analyse demonstriert, die Kennzahlen der exergoökonomischen Effektivität der Systemelemente mit einer Bewertung der Struktur und der Abhängigkeit der Elemente untereinander verbunden werden. Dazu wird die hierarchische Systemstruktur der exergetischen Analyse mit den drei Hierarchieebenen Verfahren, Teilsystem und Einzelapparat verwendet, was eine Bewertung auf jeder Ebenen und die Einschätzung der Bedeutung innerhalb der nächsthöheren Hierarchiestufe erlaubt.

Ein besonderer Problemkreis ergibt sich durch die Aufsummierung der Kosten innerhalb eines Systems, so dass eine hierarchische Bewertung eine entsprechende Erweiterung des Basiskostenkonzeptes erfordert, was durch die Betrachtung akkumulierter Zusatzkosten gelingt. Darüber hinaus erfordert die hierarchische Struktur ein Konzept zur Allokation der Systemkosten auf die Struktureinheiten.

3.4.2 Akkumulierte Zusatzkosten

Zur Bewertung der exergoökonomischen Effektivität wurde in Abschnitt 3.2.4 und 3.2.5 die Aufteilung der Gesamtkosten der Produktexergie eines Bilanzraumes in Basiskosten und Zusatzkosten vorgestellt. In einem komplexen System entsprechen die Produktströme eines Prozesses den Eintrittsströmen des nächsten Bilanzraumes, so dass sich für Bilanzräume in komplexen Systemen ebenfalls die eintretenden Kosten der Exergieströme in einen Basis- und einen Zusatzkostenanteil zerlegen lassen:

kennzeichnet. Im Zuge der Bereinigung vom Kostentransit bleibt das Verhältnis von Basiskosten zu Gesamtkosten konstant, so dass gilt:

$$\frac{\dot{K}_{IN}^B}{\dot{K}_{IN}} = \frac{\dot{K}_F^B}{\dot{K}_F} = \frac{\dot{K}_T^B}{\dot{K}_T}. \quad (3.33)$$

Der zweite Schritt zur Bereinigung der Kostenbilanz ist die Bereinigung der Feedkosten von den akkumulierten Kosten. Mit diesem Schritt, der im Diagramm mit (2) markiert ist, wird die Verzerrung der Kostenbilanz durch die Zusatzkosten von vorgelagerten Elementen im System vermieden. Dies führt zu den Basiskosten der Feedexergie:

$$\dot{K}_F^B = \dot{K}_F - \dot{K}_F^A. \quad (3.34)$$

Diese in den Bilanzraum eintretenden Kosten sind daher zweifach bereinigt:

- Die Transitbereinigung führt zu Exergiekosten, die im betrachteten Bilanzraum beeinflusst werden können, den Kosten der Feedexergie.
- Die Zusatzkosten anderer Elemente des Systems üben keinen Einfluss auf die Kostenbilanz des betrachteten Bilanzraumes aus. Allein die äußeren ökonomischen Rahmenbedingungen des Gesamtsystems werden berücksichtigt.

Damit erhält man die bereinigte Kostenbilanz eines Bilanzraumes im komplexen System mit:

$$\dot{K}_F^B + \dot{K}_I + \dot{K}_H = \dot{K}_P^B + \dot{K}_P^{A*}. \quad (3.35)$$

Die Bestimmung von Basis- und Zusatzkosten der Produktexergien erfolgt wie im Fall des oben beschriebenen einfachen Bilanzraumes. Die gesamten akkumulierten Zusatzkosten der Produkte ergeben sich an Stelle (3) in der Abbildung durch die Exergieverlustkosten und die Systemkosten des Bilanzraumes zuzüglich der akkumulierten Zusatzkosten der Feedexergie:

$$\dot{K}_P^A = \dot{K}_P^{A*} + \dot{K}_F^A = \dot{K}_{D+L} + \dot{K}_I + \dot{K}_H + \dot{K}_F^A. \quad (3.36)$$

Bei der Bestimmung der akkumulierten Kosten der Feedexergie eines Elementes muss die Systemhierarchie berücksichtigt werden. Dazu wird davon ausgegangen, dass alle Kostenströme, die von außen in die übergeordnete Hierarchieebene eintreten, noch keine Zusatzkosten aufweisen. Die Berechnung der akkumulierten Zusatzkosten erfolgt für alle Kostenströme innerhalb des Systems, unter Berücksichtigung der ökonomischen Rahmenbedingungen des Systems (Exergiepreise der in das System eintretenden Exergieströme, Investitionskosten, Zinssatz für Fremdkapital, u.s.w.). Damit umfassen die akkumulierten Kosten der Feedexergie eines Bilanzraumes alle Zusatzkosten,

die von anderen Bilanzräumen, die sich innerhalb eines betrachteten Systems befinden, verursacht wurden.

Zur Berechnung des Basis- und des Zusatzkostenanteils an den Gesamtkosten der austretenden Nutzexergieströme müssen noch die jeweiligen Anteile des Kostentransits hinzugezählt werden, wie es in der obigen Abbildung bei (4) skizziert ist, um die Aufteilung in Basis- und Zusatzkosten der austretenden Kostenströme zu erhalten.

3.4.3 Kostenallokation im hierarchischen System

Neben den Zusatzkosten, die eindeutig den Elementen E in einem System S zugeordnet werden können, besteht auch die Möglichkeit, dass einige Zusatzkosten als Gemeinkosten des Systems aufgefasst werden müssen, da eine eindeutige Zuordnung zu den Elementen nicht möglich ist. Zu diesen Gemeinkosten zählen Investitionskosten, die für das gesamte System anfallen, wie zum Beispiel die Kosten für die Einhausung des gesamten Systems, und Personal- und Wartungskosten, so beispielsweise die Personalkosten für Beschäftigte, die den Betrieb des gesamten Systems steuern. Die nachfolgende Abbildung illustriert die Situation.

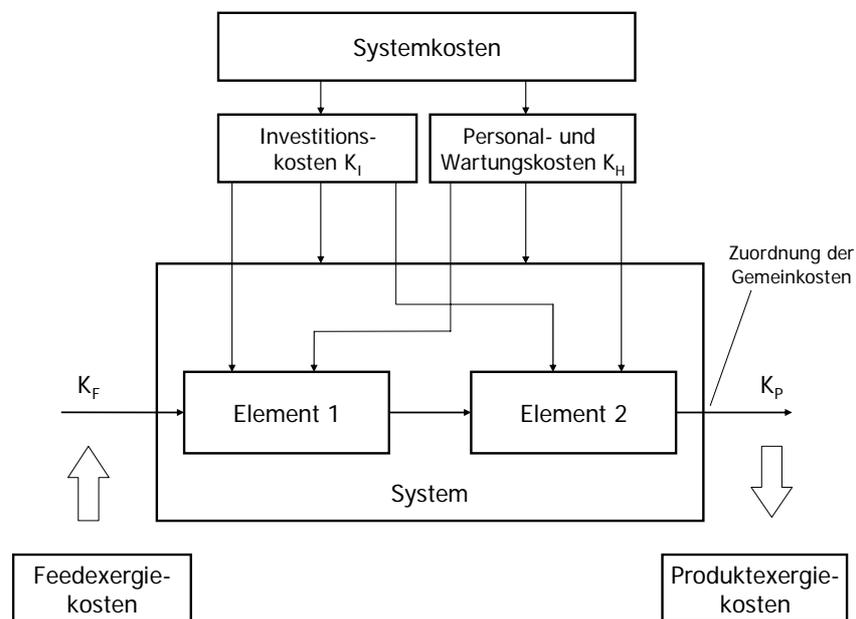


Abbildung 3.10: Exergoökonomie in strukturierten Systemen

Die Systemgemeinkosten werden nicht durch ein Umlageverfahren auf die Elemente verteilt, sondern an der Stelle, wo die Produktexergieströme die Systemgrenze übertreten, zugeordnet (siehe Abbildung 3.10). Diese Vorgehensweise dient dazu, den Prozess der Kostenentstehung zu analysieren und eine Verzerrung durch ein willkürlich gewähltes Umlageverfahren zu vermeiden. Alle Kosten, die in einem System anfallen, werden jeweils auf der Hierarchieebene den entsprechenden

Kostenträgern zugeordnet, auf der sie eindeutig zugerechnet werden können. Dies ist auch im Hinblick auf die Bewertung des Systems vorteilhaft, da so das Verursachungsprinzip in der Kostenrechnung befolgt wird und dezidiert auch Systemgemeinkosten als Quellen für einen Kostenanstieg herausgearbeitet werden können.

Eine weitere Besonderheit der Kostenrechnung tritt auf, wenn Entsorgungskosten für Abfallergergieströme, die nach außen abgegeben werden, berücksichtigt werden. Da in der exergetischen Analyse bereits der Weg der im System entstehenden Abfallstoffe mit Hilfe des äußeren Exergieverlustes erfasst und auf die verursachenden Elemente des Systems zugeordnet wurde, ist die Einbeziehung derartiger Kosten innerhalb des exergoökonomischen Kostenmodells ohne weiteres möglich. Die entsprechenden Entsorgungskosten fließen entgegengesetzt zum Strom der äußeren Exergieverluste in das System bis zum verursachenden Element. Hier werden diese Kosten als zusätzliche Kosten auf die Produkte, d. h. die Kostenträger umgelegt. Damit wird sichergestellt, dass hier ebenfalls das Verursachungsprinzip angewandt wird und die exergoökonomische Effektivität des verlustverursachenden Elementes entsprechend beeinflusst wird, was auch hinsichtlich der Interpretation der Bewertungskennzahlen vorteilhaft ist.

3.4.4 Definition systembezogener Kennzahlen

Mit Hilfe der Vorstellung von akkumulierten Zusatzkosten können nun exergoökonomische Kennzahlen zur umfassenden Bewertung von Systemelementen innerhalb einer Systemhierarchie definiert werden. Die Kennzahlen werden zunächst allgemein für ein Element E, das sich in einem übergeordneten System S befindet, definiert, bevor die entsprechenden Definitionen für die drei Hierarchiestufen Gesamtsystem, Teilsystem und Apparat angegeben werden. Die exergoökonomische Bewertung von Systemelementen, die in eine hierarchische Struktur eingebettet sind, umfasst zwei Aspekte: die ökonomische Effizienz des Elementes allein und seine Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des übergeordneten Systems. Damit erhält man ein zur exergetischen Bewertung analoges Kennzahlensystem.

Zur Beschreibung der exergoökonomischen Effizienz wird auf den oben diskutierten Zusatzkostengrad zurückgegriffen. Allerdings muss der Effekt der Akkumulation der Zusatzkosten berücksichtigt werden, so dass sich der Zusatzkostengrad eines Elementes im System mit folgender Gleichung berechnen lässt:

$$\varepsilon_K^E = \frac{\varepsilon^E \dot{K}_F^{B,E} + \dot{K}_I^E + \dot{K}_H^E}{\dot{K}_F^{B,E} + \dot{K}_I^E + \dot{K}_H^E}. \quad (3.37)$$

Im Unterschied zum Einzelement, das nach Gleichung (3.26) mit den gesamten Kosten der Feedexergie bewertet wird, werden hier die Basiskosten der Feedexergie verwendet.

Die Zusatzkosten des Elements üben einen Einfluss auf die exergoökonomische Effizienz des Systems S aus, wobei die Auswirkungen von der ökonomischen Bedeutung des Elementes abhängen. In Analogie zum exergetischen Wichtungsfaktor lässt sich eine Kennzahl angeben, die die eintretenden Kosten zum Element in das Verhältnis zu den eintretenden Kosten zum System setzt:

$$\kappa_K^E = \frac{\dot{K}_F^{B,E} + \dot{K}_I^E + \dot{K}_H^E}{\dot{K}_F^S + \dot{K}_I^S + \dot{K}_H^S}. \quad (3.38)$$

Der exergoökonomische Wichtungsfaktor zeigt, welcher Teil der Feedkosten, der Investitionskosten und der Personal- und Wartungskosten, die in das übergeordnete System eintreten, in dem zu untersuchenden Systemelement auftritt. Der Wertebereich des exergoökonomischen Wichtungsfaktors und dessen Interpretation ist dem exergetischen Wichtungsfaktor analog.

Die Auswirkungen der Zusatzkosten des Elementes E für die exergoökonomische Effektivität des Systems S, in dem es sich befindet, werden mit dem Zusatzkostenbeitrag beschrieben:

$$\lambda_K^E = \kappa_K^E \varepsilon_K^E, \quad (3.39)$$

der den exergoökonomischen Wichtungsfaktor mit dem Zusatzkostengrad multiplikativ verknüpft. Daher lässt sich der Zusatzkostenbeitrag als Verhältnis der Zusatzkosten des Elementes zu den eintretenden Kosten des übergeordneten Systems bezeichnen:

$$\lambda_K^E = \frac{\varepsilon^E \dot{K}_F^{B,E} + \dot{K}_I^E + \dot{K}_H^E}{\dot{K}_F^S + \dot{K}_I^S + \dot{K}_H^S}. \quad (3.40)$$

Diese Kennzahl gibt an, welchen Beitrag das Element zum Zusatzkostengrad eines Systems aufweist. Daher lassen sich mit dem Zusatzkostenbeitrag die Ursachen des Kostenanstieges im System lokalisieren und ihre Bedeutung für die exergoökonomische Effizienz des Systems einordnen. Diejenigen Systemelemente, die durch einen hohen Zusatzkostengrad gekennzeichnet sind, stellen einen Ansatzpunkt für Verbesserungen dar, da durch die Anwendung der oben erläuterten Konzepte in der Kostenrechnung, mit der Kennzahl die Ursachen der Zusatzkosten erfasst werden.

Neben den Zusatzkostenbeiträgen der Systemelemente treten in der Kostenrechnung noch Zusatzkosten auf, die sich nicht eindeutig den Elementen zuordnen lassen. Dies gilt für alle Systemkosten, die den Charakter von Gemeinkosten aufweisen und, wie oben beschrieben auf die Produktexer-

geströme, die über die Systemgrenze treten, exergetisch umgelegt werden. Deshalb existiert neben den Zusatzkostenbeiträgen der Systemelemente noch ein Zusatzkostenbeitrag durch Gemeinkosten des Systems. Die Kennzahl setzt die Gemeinkosten in das Verhältnis zu den eintretenden Kosten in das System:

$$\lambda_K^{E^*} = \frac{\dot{K}_{I,GK}^S + \dot{K}_{H,GK}^S}{\dot{K}_F^S + \dot{K}_I^S + \dot{K}_H^S}. \quad (3.41)$$

Die Summation über alle Zusatzkostenbeiträge der Elemente sowie des Zusatzkostenbeitrages durch Gemeinkosten führt zum Zusatzkostengrad des Systems:

$$\varepsilon_K^S = \sum_E \lambda_K^E + \lambda_K^{E^*} = \sum_E \kappa_K^E \varepsilon_K^E + \lambda_K^{E^*}. \quad (3.42)$$

Damit bilden die definierten Kennzahlen Zusatzkostengrad, exergoökonomischer Wichtungsfaktor und Zusatzkostenbeitrag ein geschlossenes Bewertungssystem, das den formulierten Zielen der exergoökonomischen Analyse gerecht wird.

Die Anwendung des allgemein definierten Kennzahlensystems auf die hierarchische Struktur mit den Ebenen Gesamtsystem, Teilsystem und Apparat ergibt die in nachstehenden Tabelle zusammengefassten Bewertungsgrößen.

Tabelle 3.2: Exergoökonomische Bewertungskennzahlen

	Teilsystem im Gesamtsystem	Apparat im Teilsystem
Zusatzkostengrad	$\varepsilon_K^{SS} = \frac{\varepsilon^{SS} \dot{K}_F^{B,SS} + \dot{K}_I^{SS} + \dot{K}_H^{SS}}{\dot{K}_F^{B,SS} + \dot{K}_I^{SS} + \dot{K}_H^{SS}}$	$\varepsilon_K^U = \frac{\varepsilon^U \dot{K}_F^{B,U} + \dot{K}_I^U + \dot{K}_H^U}{\dot{K}_F^{B,U} + \dot{K}_I^U + \dot{K}_H^U}$
Exergoökonomischer Wichtungsfaktor	$\kappa_K^{SS} = \frac{\dot{K}_F^{B,SS} + \dot{K}_I^{SS} + \dot{K}_H^{SS}}{\dot{K}_F^{TS} + \dot{K}_I^{TS} + \dot{K}_H^{TS}}$	$\kappa_K^U = \frac{\dot{K}_F^{B,U} + \dot{K}_I^U + \dot{K}_H^U}{\dot{K}_F^{SS} + \dot{K}_I^{SS} + \dot{K}_H^{SS}}$
Zusatzkostenbeitrag	$\lambda_K^{SS} = \kappa_K^{SS} \varepsilon_K^{SS}$	$\lambda_K^U = \kappa_K^U \varepsilon_K^U$

3.4.5 Bewertung mit dem Basiskostenfaktor

Zusätzlich zu dem Kennzahlensystem der Systemelemente erlaubt die Definition von Basiskosten auch die exergoökonomische Einschätzung der Stoff- und Energieströme, die sich im System oder

den Verbindungsstellen zur Systemumgebung befinden. Der Ausgangspunkt für diese zusätzliche strombezogene Bewertung liegt in den oben genannten Zusatzkosten des Bilanzraumes K^{A^*} , die die Produktströme des Bilanzraumes in Abhängigkeit von ihrer Exergie zu tragen haben. Bei Anwendung dieses Bewertungskonzepts lassen sich alle Kostenströme im System in Basiskosten und Zusatzkosten unterteilen. Die Kosten der Exergieströme steigen beim Durchgang durch das System durch die auftretenden Zusatzkosten an. Folglich summieren sich diese Zusatzkosten der einzelnen Bilanzräume wie oben beschrieben zu den akkumulierten Zusatzkosten auf und bieten sich für die strombezogene Bewertung an. Für jeden Exergiestrom lässt sich ein Basiskostenanteil angeben, der die minimalen Kosten, die zur Erzeugung dieses Stroms bei den gegebenen ökonomischen Rahmenbedingungen notwendig sind, beschreibt. Damit eröffnet sich die Möglichkeit einer Bewertung, indem man die Basiskosten K^B zu den Gesamtkosten K^T des Exergiestromes ins Verhältnis setzt:

$$\omega_K = \frac{\dot{K}^B}{\dot{K}} \quad (3.43)$$

Dieser Basiskostenfaktor gibt den exergoökonomische Aufwand an, mit dem der betrachtete Exergiestrom erzeugt wurde. Ein Basiskostenfaktor von eins zeigt, dass noch keine Zusatzkosten vom Strom zu tragen sind, was auf einen in das System von außen eintretenden Strom hindeutet. Die Kennzahl ist besonders geeignet, Kuppelprodukte eines Systems im Hinblick auf die exergoökonomische Effizienz ihrer Erzeugung zu vergleichen.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, von außen in das System eintretende Exergieströme mit einem Basisexergiefaktor von kleiner als eins zu bewerten, um Informationen über die vorgelagerten Verfahrensschritte mit in die Bewertung einzubeziehen.

3.4.6 Ableitung von Verbesserungspotentialen

Mit den abgeleiteten Kennzahlen steht ein Bewertungssystem zur Verfügung, mit dem die Ursachen für Kostenanstiege in komplexen Systemen analysiert und Potentiale zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit herausgearbeitet werden können. Es ist zweckmäßig, bei der Betrachtung des Systems von der höchsten Hierarchiestufe auszugehen.

Auf der Ebene des Gesamtsystems lassen sich zunächst prinzipielle Aussagen zu den Kosten des gewählten Verfahrens erzielen. Die Berechnung der Basiskosten ist hierbei vorteilhaft, da so das Kostenminimum des Verfahrens bei den gegebenen ökonomischen Rahmenbedingungen sichtbar wird. Weiterhin ist die Betrachtung des Basisexergiefaktors der Produktexergieströme hilfreich, um

das Verhältnis von naturgesetzlich bedingten und tatsächlichen Kosten der erzeugten Produkte einzuschätzen und gegebenenfalls Modifikationen im Produktionsprogramm bei Kuppelproduktionen vorzunehmen. Außerdem lässt sich das gewählte Verfahren mit Hilfe des Zusatzkostengrades mit alternativen Möglichkeiten der Erzeugung der gewünschten Produkte vergleichen. Die Betrachtung der Zusatzkostenanteile des Gesamtverfahrens – auch mit Hilfe der beschriebenen Diagrammdarstellungen – zeigt an, welcher Anteil der Zusatzkosten die Wirtschaftlichkeit am stärksten beeinflusst und welchem Zusatzkostenanteil bei einer Modifikation besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Eine detaillierte Betrachtung der Ursachen der Zusatzkosten und der Kostenentwicklung im Verfahren ermöglicht die Methode durch die Bewertung der Struktureinheiten des Systems mit Hilfe der oben definierten Kennzahlen Zusatzkostengrad, exergoökonomischer Wichtungsfaktor und Zusatzkostenbeitrag. Mit diesem Instrumentarium und aufgrund der verursachungsgerechten Kostenzuordnung lassen sich die Elemente bestimmen, die durch die von ihnen verursachten Zusatzkosten die Wirtschaftlichkeit maßgeblich beeinflussen. Zum einem sollten Verfahrensschritte und Prozesse mit hohen Zusatzkostenbeiträgen grundsätzlich bezüglich ihrer Notwendigkeit innerhalb des Verfahrens hinterfragt werden und alternative Lösungen in Erwägung gezogen werden. Zum anderen kann durch die Betrachtung der Verteilung der Zusatzkostenanteile in solchen Elementen aufgezeigt werden, welche Zusatzkostenanteile besonders negative Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit haben.

Durch die Bewertung der Exergieströme mit Hilfe des Basiskostenfaktors kann die Kostenentstehung und -entwicklung im komplexen Verfahren nachvollzogen werden, was besonders für die Untersuchung von Kuppelprodukten interessant ist. Die Betrachtung von möglichen Alternativszenarien der ökonomischen Rahmenbedingungen durch Varianten der entsprechenden Eingangsgrößen ist hilfreich, um die Auswirkungen auf das untersuchte System abzuschätzen.

3.4.7 Vergleich mit alternativen Bewertungsmethoden

Neben der exergoökonomischen Methode existiert in der Energiewirtschaft eine Vielzahl von Modellen, die sich insbesondere mit der Kostenallokation bei gekoppelter Erzeugung beschäftigen [KUG90, OTT69, WIN91].

Ein exergoökonomisches Bewertungskonzept wurde von TSATSARONIS [BEJ96, TSA93, TSA96, TSA99, TSA05] entwickelt. Das Ziel ist die Verbindung von exergetischer Betrachtung und ökonomischen Überlegungen, um das Kostenminimum eines Verfahrens bzw. seiner Komponenten zu bestimmen. Den Ausgangspunkt bildet hier ebenfalls die exergetische Analyse, wofür eine Exergiebilanz, wie sie in Gleichung (2.17) angegeben ist, verwendet wird. Als exergetische Bewertungskennziffern werden der Wirkungsgrad η einer Komponente E und das Exergieverlustverhältnis

nis verwendet, das die Exergieverluste der Komponente auf die gesamte dem System zugeführte Feedexergie bezieht:

$$y_D^E = \frac{\dot{E}_D^E}{\dot{E}_F^E}. \quad (3.44)$$

An diese Analyse schließt sich die exergoökonomische Betrachtung an. Dazu werden für jede Komponente E des betrachteten Verfahrens

- die Exergieverlustkosten durch innere Exergieverluste K_D ,
- die Exergieverlustkosten durch äußere Exergieverluste K_L ,
- die Investitionskosten K_I und
- die Betriebs- und Wartungskosten K_H

bestimmt. Zur Einschätzung der exergoökonomischen Situation wird die relative Kostendifferenz, die den Anstieg des mittleren Exergiepreises im Verhältnis zum mittleren Feedexergiepreis charakterisiert, verwendet:

$$r = \frac{k_p - k_F}{k_F} = \frac{\varepsilon}{\eta} + \frac{\dot{K}_I + \dot{K}_H}{\eta \dot{K}_F}. \quad (3.45)$$

Diese Kennzahl lässt sich in zwei Terme zerlegen, wovon der erste den Kostenanstieg durch Exergieverluste über das Verhältnis von Verlustgrad zu Wirkungsgrad ausdrückt, während der zweite Term die Effekte, die durch die Systemkosten hervorgerufen werden, beschreibt. Eine weitere Bewertungsgröße ist die Relation von Exergieverlustkosten zu den Systemkosten, die als exergoökonomischer Faktor bezeichnet wird:

$$f = \frac{\dot{K}_I + \dot{K}_H}{\dot{K}_{D+L} + \dot{K}_I + \dot{K}_H}. \quad (3.46)$$

Die Kenngröße bezieht die Systemkosten auf die Summe aus Exergieverlustkosten und Systemkosten. Mit Hilfe dieser exergoökonomischer Bewertungsziffern lassen sich für gegebene ökonomische Rahmenbedingungen ein optimaler relativer Kostenanstieg für jede Komponente im System berechnen [TSA96].

Die Zielstellung der exergoökonomischen Bewertung nach TSATSARONIS und dem in dieser Arbeit vorgestellten Konzept ist ähnlich. Die Vorgehensweise bei der exergetischen Bilanzierung der Komponenten ist gleich, jedoch ergeben sich Unterschiede bei den verwendeten Bewertungs-

kennzahlen, da im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Schwerpunkt auf der hierarchischen Systemstruktur liegt. Daher wurde dem Verlustgrad aufgrund seiner Eigenschaft der Additivität der Vorzug gegeben und zusätzliche Kennzahlen zur Beschreibung des hierarchisch gegliederten Systems und zur Lokalisierung der Verluste angegeben. Beide Konzepte betrachten neben den Exergieverlustkosten auch die Systemkosten des Verfahrens. Die Bewertung unterscheidet sich jedoch durch die verwendeten Kennzahlen, da für die Bildung der relativen Kostendifferenz die Kosten der Feedexergie als Bezugsgröße des Kostenanstieges verwendet werden, während der Zusatzkostengrad das Verhältnis von Exergieverlust- und Systemkosten zu den Gesamtkosten definiert. Darüber hinaus werden die minimalen Kosten eines Bilanzraumes bestimmt und Basiskosten von Zusatzkosten unterschieden. Im Unterschied zu den vermeidbaren und nicht vermeidbaren Kosten [TSA99], die vom Stand der Technik ausgehen und damit aktuell nutzbare Kostensenkungspotentiale offenbaren, geben die Basiskosten die naturgesetzlichen Minimalkosten eines Bilanzraumes für gegebene ökonomische Rahmenbedingungen an.

Eine weitere Möglichkeit, komplexe Systeme ökonomisch zu untersuchen, bietet die bereits in Abschnitt 3.1.2 erwähnte Flusskostenrechnung [ANT00, FIS97, HES99, LOE00, LOE04]. Diese besondere Form der Kostenrechnung unterscheidet sich von den traditionellen Ansätzen der Kostenrechnung, da sie den Kostenfluss im Unternehmen abbildet und daher an den stofflich-energetischen Flussbeziehungen in einem Unternehmen ausgerichtet ist [TSC03].

Der Ausgangspunkt der Flusskostenrechnung, die als Teilgebiet der Umweltkostenrechnung aufgefasst werden kann [BUN96, BUN01], ist wie bei der exergoökonomischen Betrachtung die Feststellung, dass die Material- und Energiekosten einen großen Anteil an den Gesamtkosten einnehmen und daher als Kostentreiber angesehen werden. Die Zielstellungen, die diesem Ansatz zugrunde liegen, sind:

- die Reduzierung von Materialverlusten und Umweltbelastungen,
- die Transparenz im Unternehmen durch Informationen über Ressourcenflüsse und
- die Erschließung von Kostensenkungspotentialen.

Zur Umsetzung dieser Art der Kostenrechnung benötigt man ein Modell der Material- und Energieflüsse, die das Gesamtsystem (hier: Unternehmen, Standort oder Anlage), das in so genannte Mengenstellen untergliedert ist, durchlaufen. Die in das System eintretenden Ströme sind bereits mit Materialkosten belastet. Beim Durchlaufen des Systems fallen zusätzlich Bearbeitungskosten an. Diese Kosten, die durch das Management des Materialflusses entstehen, resultieren hauptsächlich aus Abschreibungskosten für Investitionen und aus Personalkosten. Den dritten Kostenblock stellen die Entsorgungskosten, die für die Beseitigung von Abfällen, Abwässern und Abwärme

anfallen. Die Materialkosten, die Bearbeitungskosten und die Entsorgungskosten bilden die Flusskosten des Systems und man erhält die nachfolgende dargestellte Kostenstruktur.

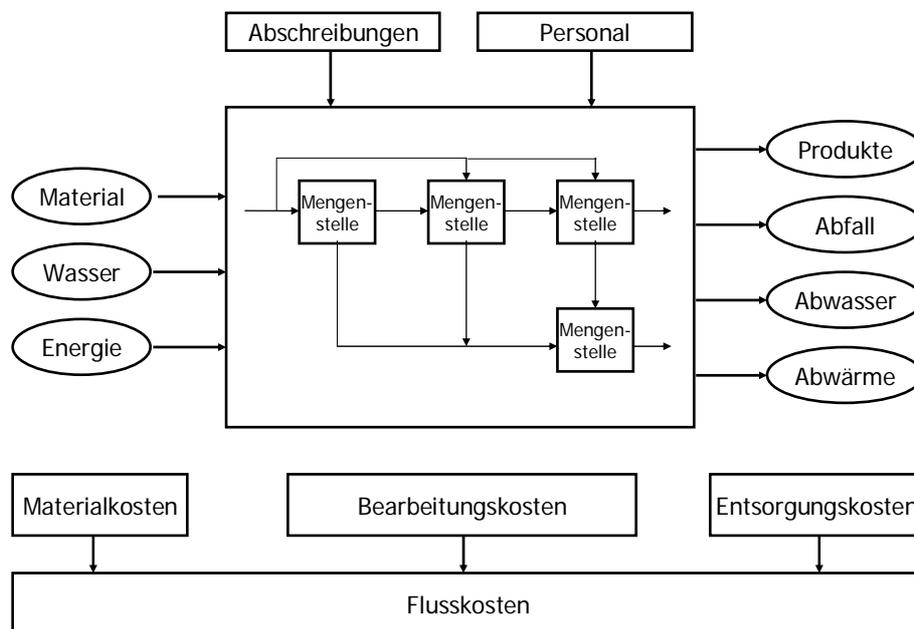


Abbildung 3.11: Schema der Flusskostenrechnung

Die durch das System der Mengenstellen fließenden Stoff- und Energieströme tragen die entstehenden Kosten und ermöglichen dadurch eine transparente und systematische Analyse von Kostenflüssen im System. Durch die Ausrichtung an den Stoff- und Energieflüssen gelingt es, Informationen über das System zu generieren, die für ein Stoffstrommanagement erforderlich sind und um Schwachstellen aufzudecken. Die im Zusammenhang mit der Umweltorientierung bei derartigen Prozessen besonders interessante Fragestellung der Internalisierung externer Effekte lässt sich durch die detaillierte Bestimmung der Ursachen dieser externen Effekte im System und deren verursachungsgerechte Zuordnung behandeln.

Die exergoökonomische Analyse- und Bewertungsmethode hat, da sie ebenfalls die Flussbeziehungen in einem System als Modellierungsgrundlage verwendet, Ähnlichkeiten mit dem Konzept der Flusskostenrechnung. In beiden Ansätzen werden die Stoff- und Energieströme im System als Kostentreiber angesehen. Der Vorteil der exergoökonomischen Methode liegt in der einheitlichen Abbildung aller Ströme mit Hilfe der Exergie. Dadurch wird ein Operieren mit verschiedenen physikalischen Größen wie bei der Flusskostenrechnung vermieden. Eine Gemeinsamkeit ist weiterhin die Behandlung der Investitions- und Personalkosten als von den Stoff- und Energieströmen nicht unmittelbar abhängigen Kosten und deren Zuordnung als Systemkosten. Durch die hierarchische Gliederung der Gesamtanlage können mit Hilfe der exergoökonomischen Methode die Sys-

temkosten auf der untersten möglichen Ebene ausgewiesen und damit so verursachungsgerecht wie möglich behandelt werden.

Einige Unterschiede ergeben sich aus den zugrunde liegenden Zielstellungen. Die exergoökonomische Analyse hat durch das vorgestellte Kennzahlensystem zusätzliche Vorteile im Bereich der Planung und Weiterentwicklung von Verfahren. Gleichzeitig kann sie auch als eine naturgesetzlich determinierte Variante der Kostenrechnung aufgefasst werden, da sie thermodynamische Zusammenhänge mit ökonomischen Gesetzmäßigkeiten verbindet. Die Flusskostenrechnung hingegen zielt neben der Ressourceneffizienz auch auf die organisatorische Flussorientierung im Unternehmen und ist weniger technologieorientiert. Die wesentliche Differenz besteht in der Bestimmung der Entsorgungskosten bzw. der Kosten der Abprodukte. Innerhalb der vorgestellten Methode werden diese Kosten der Exergieverluste auf die Produkte verrechnet, während bei der Anwendung der Flusskostenrechnung diese Kosten separat ausgewiesen und der Kostenstrom auch für die Abprodukte bestimmt wird.

4 Anwendungsbeispiele

Im folgenden Kapitel soll die Anwendbarkeit des vorgestellten Bewertungskonzeptes demonstriert werden. Zunächst wird die Vorgehensweise bei der Berechnung und die verwendete Software vorgestellt, bevor die Anwendungsbeispiele näher erläutert werden. Die beiden ausgewählten Verfahren sind dem Bereich der Nutzung von Abfallstoffen zuzuordnen. Das erste Beispiel zeigt die energetische Verwertung von Abfällen, die bei der Recyclingpapierherstellung anfallen. Die Pyrolyse von Altreifen wurde als zweites Beispiel ausgewählt, da hier eine kombinierte stoffliche und energetische Nutzung des Abfallstoffes vorliegt. Beide Verfahren befinden sich in der Entwicklungsphase und eignen sich daher besonders für eine exergoökonomische Analyse, die auf mögliche Prozessverbesserung abzielt.

4.1 Rechnerische Umsetzung

Die exergetische und exergoökonomische Analyse von energie- und stoffumwandelnden Anlagen erfordert die Modellierung des Verfahrens, um es einer Bewertung zugänglich zu machen. Die Voraussetzung hierfür sind die Mess- und Auslegungsdaten des Untersuchungsobjektes und der Umfang und die Detailliertheit, mit denen diese Daten zur Verfügung stehen bzw. erhoben werden können.

Daher bestehen die ersten Arbeitsschritte in der Festlegung des Umfangs der Analyse und der Abgrenzung des zu untersuchenden Bilanzraums durch die Festlegung der Bilanzgrenzen des Verfahrens. Nach diesen Vorgaben können die benötigten bzw. noch zu ermittelnden Daten des Verfahrens benannt werden. Beginnend mit den Stoff- und Energieströmen, die über die Bilanzgrenze des Systems treten und in Abhängigkeit von dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial lässt sich nun ein Anlagenschema aufstellen, das die Prozesse und die zwischen ihnen verlaufenden Relationen enthält. Da für die Bewertung von einem stationären Betriebspunkt ausgegangen wird, stellt das Anlagenschema gleichzeitig das Flussmodell der Stoff- und Energieströme dar. Während des Prozesses der Modellbildung ist es erforderlich, einen Kompromiss zwischen den Anforderungen an die Genauigkeit der durchzuführenden Analyse und dem vorhandenen Datenmaterial zu finden. Das resultierende Anlagenfließschema bildet zugleich die Grundlage für die hierarchische Strukturierung des Systems.

Als nächster Schritt müssen die Daten, die zur Berechnung der Exergie der im System auftretenden Stoff- und Energieströme notwendig sind, bestimmt werden. Neben dem Umgebungszustand wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben werden für die Berechnung der Exergie der Stoffströme des Unter-

suchungsobjektes der Massenstrom, die Temperatur, der Druck und die stoffliche Zusammensetzung als Datengrundlage benötigt. Die Exergieberechnung der Energieströme im System erfordert neben der Angabe der Energiemenge bei Wärmeströmen zusätzlich eine Aussage über das Temperaturniveau. Zusätzlich müssen die ökonomischen Daten erfasst werden, die sowohl durch die ökonomischen Randbedingungen, die zum Beispiel durch Exergiepreise und das Zinsniveau gegeben sind, als auch als Systemkosten, d. h. als Investitionskosten sowie Personal- und Wartungskosten der Struktureinheiten, vorliegen.

Diesen vorbereitenden Arbeiten schließt sich die Berechnung der Exergie der Stoff- und Energieströme des Systems an. Hierzu wird im Rahmen der Arbeit das Berechnungsprogramm Mathcad 11 verwendet. Das Programm verfügt über eine graphische Benutzeroberfläche, ermöglicht eine übersichtliche Darstellung der verwendeten Berechnungsgleichungen und bietet die zur Anwendung der neuen Methodik notwendige Flexibilität. Zudem bietet es die Möglichkeit, die Berechnungen in SI-Einheiten vorzunehmen und die im Programmpaket vorhandenen vorgefertigten Funktionen, wie etwa zum Auflösen von linearen Gleichungssystemen, zu verwenden. Darüber hinaus erlaubt die Software die Definition eigener Funktionen, die in separaten Dateien abgelegt und bei Bedarf aufgerufen und genutzt werden können. Zusätzlich zum eigentlichen Berechnungsprogramm wurde das Zusatzpaket „Steam Table Extension Pack“ verwendet. Im Paket sind die genormten Wasserdampfatafel hinterlegt und es werden spezielle Funktionen, mit deren Hilfe man Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf ermitteln kann, bereitgestellt [MAT98].

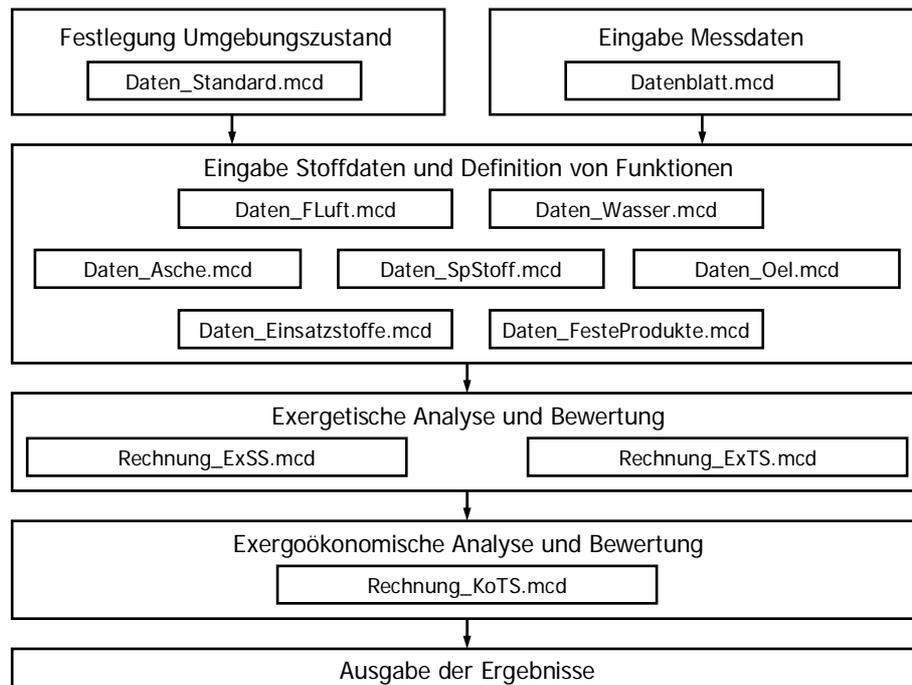


Abbildung 4.1: Aufbau der Rechnung

Zur Berechnung aller erforderlichen Größen wurde ein strukturiertes Dateipaket mit entsprechenden Berechnungsmodellen für ausgewählte Stoffgruppen entwickelt, das sich aus den Mathcad-Arbeitsblättern zusammensetzt. Die Arbeitsblätter, die die Funktionen und Gleichungen für die Berechnungen enthalten, können miteinander verlinkt werden, so dass ein modulares System von Berechnungsdateien entsteht, wie in Abbildung 4.1 dargestellt ist.

Der prinzipielle Inhalt der Berechnungsblätter wird nachfolgend kurz umrissen. Detaillierter Angaben zu den verwendeten Stoffdaten und zur Vorgehensweise bei der Berechnung befinden sich im Anhang. Die Datei „Daten_Standard.mcd“ bildet die Basis der Berechnungen, da hier der Standardzustand, der Bezugszustand für die Standardbildungsgrößen und der Umgebungszustand festgelegt werden. Außerdem werden hier die für die Rechnung benötigten Einheiten definiert. In der Datei „Datenblatt.mcd“ werden die vorhandenen thermodynamischen Mess- und Auslegungswerte sowie ökonomische Daten gesammelt und entsprechenden Variablen zugewiesen. Dabei wird zur Bezeichnung der Exergie- und Kostenströme im System von den durchströmten Elementen ausgegangen, so dass der Index $x.y$ den Strom von Element x des Systems zu Element y charakterisiert. Falls mehrere Exergieströme von Element x zu Element y übergehen, ist die zusätzliche Kennzeichnung der einzelnen Exergieströme durch ein entsprechendes Symbol erforderlich.

Die spezifischen Dateien der Stoffgruppen umfassen die zur exergetischen und exergoökonomischen Analyse notwendigen Berechnungsgleichungen und -funktionen. Dazu gehören die Funktionen zur Bestimmung der spezifischen Enthalpie und Entropie der Stoffe, die Ermittlung der resultierenden Umgebungsstoffe, die Berechnung von spezifischer Enthalpie und Entropie dieser Umgebungsstoffe und schließlich die Berechnungsvorschrift der spezifischen Exergie und der thermischen, mechanischen, chemischen und der Konzentrationsexergieanteile. Die in diesen Dateien allgemein definierten Funktionen werden für die Berechnungsdateien der exergetischen und exergoökonomischen Analyse und Bewertung zur Verfügung gestellt und können nach der Verlinkung mit einem Funktionsbefehl abgerufen werden.

Die Luft bzw. das brennbare Gas wird in der Datei „Daten_FLuft.mcd“ als Mischung der Bestandteile Sauerstoff (O_2), Stickstoff (N_2), Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoff (H_2), Methan (CH_4), Ethen (C_2H_4) und Wasser (H_2O) betrachtet. Die Datei enthält Funktionen zur Berechnung der spezifischen Enthalpie und Entropie des Gasgemisches in Abhängigkeit von den Zustandsgrößen Druck, Temperatur und Zusammensetzung. Dabei werden in der Funktion die Möglichkeit der Sättigung des Gasgemisches mit Wasserdampf und der Anfall von flüssigem Wasser bei Übersättigung berücksichtigt. Zur Bestimmung der Exergie ist die Berechnung der spezifischen Enthalpie und Entropie der entstehenden Umgebungsstoffe notwendig. Als Umgebungsstoffe entstehen durch entsprechende Reaktionen die Gasbestandteile Kohlendioxid und Wasser. Falls

der Sauerstoff im Gasgemisch nicht ausreicht, um die entsprechenden Reaktionen auszuführen, muss aus der Umgebungsluft Sauerstoff bezogen werden, was bei der Berechnung ebenfalls berücksichtigt wird. Es wird eine Funktion definiert, die die spezifische Exergie des Gasgemisches in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Zusammensetzung berechnet.

Die entsprechende Funktion zur Berechnung der Exergie von Wasser ist in der Datei „Daten_Wasser.mcd“ angegeben. Dabei wird eine Fallunterscheidung zwischen den Zustandsbereichen Wasserdampf und flüssiges Wasser zur Bestimmung von Enthalpie und Entropie vorgenommen. Da Wasser im Modell gleichzeitig als Umgebungsstoff auftritt, können diese Funktionen auch zur Berechnung des Umgebungszustandes verwendet werden. Schließlich wird eine Berechnungsvorschrift für die spezifische Exergie des Wassers in Abhängigkeit von Druck und Temperatur angegeben.

Die benötigten Funktionen für die Exergieberechnung der eingesetzten Abfallstoffe der Papierindustrie bei der Vergasung, der so genannten Spuckstoffe, sind in der Datei „Daten_Spstoff.mcd“ zusammengestellt. Das Berechnungsblatt umfasst die Stoffdaten des Abfallstoffes, der sich im Modell aus fünf Komponenten zusammensetzt: Holzstruktur, Lignin, Inerte, Kunststoffe (Polyethylen) und Feuchte. Neben den Funktionen zur Berechnung der spezifischen Enthalpie und Entropie, die in ähnlicher Weise wie im Berechnungsblatt der feuchten Luft realisiert sind, muss der Umsatz des Abfallstoffes zu Umgebungsstoffen berechnet werden. Neben den bereits genannten Umgebungsstoffen CO_2 und H_2O wird zusätzlich inerte Asche als Umgebungsstoff verwendet. Dadurch lässt sich die spezifische Exergiefunktion in Abhängigkeit von Temperatur und Zusammensetzung des Abfallstoffs definieren.

Die bei der Vergasung des Abfallstoffes zurückbleibende Asche wird mit der Datei „Daten_Asche.mcd“ berechenbar. Die Asche wird als ein Gemisch aus den drei Komponenten Restkohlenstoff, inerte Bestandteile und Wasser aufgefasst. In ähnlicher Weise wie bei der Berechnung des Abfallstoffes werden die Enthalpie- und Entropiefunktion ermittelt und die resultierenden Umgebungsstoffe (CO_2 , H_2O , inerte Asche) bestimmt. Anschließend wird eine Exergiefunktion in Abhängigkeit von der Temperatur und der Zusammensetzung zur Berechnung bereitgestellt.

In dem Berechnungsprogramm für Altreifen („Daten_Einsatzstoffe“) werden ebenfalls zuerst die benötigten Stoffdaten des Stoffgemisches, das aus den Komponenten Gummi, Ruß und Stahl besteht, definiert. Für die Berechnung des Gummiantteils ist eine Elementaranalyse notwendig, so dass die einatzstoffspezifische Zusammensetzung der entstehenden Umgebungsstoffe CO_2 , H_2O , Gips und Eisenoxid berechnet und die erforderlichen spezifischen Enthalpie- und Entropiefunktionen der Umgebungsstoffe angegeben werden können. Im Anschluss wird mit Hilfe der Verbands-

formel nach BOIE die chemische Enthalpie der eingesetzten Altreifen bestimmt. Mit Hilfe der gefundenen Funktion für Enthalpie und Entropie der Einsatzstoffe kann die spezifische Exergie in Abhängigkeit von der Temperatur und der Zusammensetzung angegeben werden.

Eine ähnliche Vorgehensweise liegt auch den in der Datei „Daten_Oel.mcd“ hinterlegten Funktionen zur Berechnung des Pyrolyseöls zugrunde, da für dieses Stoffgemisch auch von einer Elementaranalyse ausgegangen werden muss, um die Berechnungsformel für die spezifische Exergie des Pyrolyseöls in Abhängigkeit von der Temperatur und der Zusammensetzung zu definieren.

Die Funktionen für die festen Produkte der Altreifenpyrolyse, die Ruß, Stahl und den nichtpyrolysierten Kordanteil des Reifens umfassen, werden in der Datei „Daten_FesteProdukte.mcd“ betrachtet. Für die Berechnung von Enthalpie und Entropie der Pyrolyseprodukte und der entstehenden Umgebungsstoffe werden entsprechende Funktionen in Analogie zu den Altreifen angegeben, die die Ermittlung der spezifischen Exergie als Funktion von der Temperatur und der Zusammensetzung erlauben.

Mit dem Dateipaket, das die Umgebungsdefinition, die Datenblätter und die Exergiefunktionen für ausgewählte Stoffgruppen umfasst, kann die exergetische Analyse des Untersuchungsobjektes durchgeführt werden. Diese exergetische Analyse lässt sich in die zwei Berechnungsteile „Hierarchische Bilanzierung“ und „Hierarchisch strukturierte Bewertung“ gliedern.

Der erste Teil der Analyse umfasst die Bilanzierung aller im System definierten Bilanzräume. Beginnend mit der untersten Hierarchieebene (Apparatebene) wird für jedes Element der Hierarchiestufe

- die Massenbilanz,
- die Energiebilanz und
- die Exergiebilanz

aufgestellt.

Sofern nicht alle Massenströme im System aus Mess- und Auslegungsdaten bekannt sind, können die Massenbilanzen genutzt werden. Für Bilanzräume mit chemischen Reaktionen ist zusätzlich das Aufstellen von Komponentenbilanzen erforderlich. Falls die Zusammensetzung von Reaktionsprodukten nicht bekannt ist, muss an dieser Stelle eine separate Berechnung der Reaktion durchgeführt werden. Die Energiebilanz, die ebenfalls wie die Massenbilanz dem Erhaltungssatz unterliegt, wird zur Kontrolle oder zur Bestimmung der Energiemenge, die beispielsweise als Abwärme den Bilanzraum verlässt und daher nicht in den Enthalpien der Stoffströme auftritt, genutzt.

Zur exergetischen Bilanzierung werden die in den Stoffgruppendateien bereitgestellten spezifischen Exergiefunktionen genutzt, die neben der Gesamtexergie eines Stoffstromes auch die Berechnung der thermischen, mechanischen, chemischen und der Konzentrationsexergieanteile zulassen. Die Exergiebilanz eines Bilanzraumes kann, wie in Kapitel 3 erläutert, nur durch einen Verlustterm geschlossen werden, der die inneren Verluste E_D durch Dissipation widerspiegelt, und an dieser Stelle für jeden Apparat berechnet wird. Als nächster Schritt schließt sich die Bestimmung der Exergietransite des Bilanzraumes an, die in Abhängigkeit von der gewählten Transitbereinigungsvariante spezifisch für jeden Exergiestrom angegeben werden.

Nach der Bilanzierung der Apparatebene folgt die Bilanzierung der nächsthöheren Hierarchieebene, der Teilsystemebene. Aus den Daten der untersten Ebene ist abzulesen, welche Stoff- und Energieströme die Bilanzgrenze des Teilsystems überschreiten und folglich in der Massenbilanz, der Energiebilanz und der Exergiebilanz des Teilsystems berücksichtigt werden müssen. Analog zur Apparatebene wird auch auf der Teilsystemebene der Exergieverlust durch Dissipation aus der Exergiebilanz bestimmt und der Exergietransit durch das Teilsystem ermittelt.

Die Aufstellung der Massenbilanz, der Energiebilanz und der Exergiebilanz des Gesamtsystems sowie die Ermittlung des inneren Exergieverlusts des Systems und des Exergietransits bilden den Abschluss des ersten Berechnungsteils der exergetischen Analyse.

Im zweiten Berechnungsteil sind zunächst die äußeren Exergieverluste des Gesamtsystems zu bestimmen. Dazu werden die austretenden Exergieströme in Haupt- und Nebenprodukte sowie in Abprodukte unterteilt. Danach verfolgt man den Weg der Exergie der Abprodukte in das System hinein, um das verursachende Systemelement zu bestimmen und um zwischen direkten und indirekten äußeren Exergieverlusten zu unterscheiden. Nach der Zuordnung der äußeren Verluste werden für alle Elemente der Hierarchiestufen, beginnend mit dem Gesamtsystem, die Kennzahlen

- Gütegrad,
- Wirkungsgrad,
- innerer, äußerer und gesamter Verlustgrad,
- Wichtungsfaktor und
- Verlustbeitrag

zur hierarchisch strukturierten exergetischen Bewertung des Systems bestimmt.

Um eine Bewertung der Exergieströme des Systems vornehmen zu können, werden die akkumulierten Exergieverluste mit Hilfe von Gleichungssystemen berechnet. In diesen linearen Glei-

chungssystemen werden die Exergieverluste der untersuchten Bilanzräume bestimmt und exergetisch auf die Produktströme aufgeteilt, so dass für jeden Exergiestrom die akkumulierten Exergieverluste ermittelt werden. Ein Gleichungssystem wird zur Bestimmung der akkumulierten Exergieverluste nach Abschnitt 2.5.3.2 auf der Ebene der Teilsysteme genutzt, um eine Bewertung der summierten Exergieströme mit Hilfe des Basisexergiefaktors zu realisieren. Anschließend wird auf dem Niveau der Apparate ebenfalls ein Gleichungssystem aufgestellt und gelöst, das eine detaillierte Bewertung der Exergieströme mit dem Basisexergiefaktor ermöglicht.

Aufbauend auf den Ergebnissen der exergetischen Analyse folgt in einem weiteren Mathcad-Arbeitsblatt die exergoökonomische Analyse und Bewertung. Zu diesem Zweck werden zunächst die Kosten der ins System eintretenden Exergieströme über den berechneten Exergiestrom und den Exergiepreis bestimmt. Zusätzlich werden die Systemkosten berücksichtigt. Hierzu werden die jährlichen Investitionskosten aus den Apparate- und Ausrüstungskosten unter Berücksichtigung der gegebenen ökonomischen Rahmenbedingungen berechnet. Zusätzlich werden die Personal- und Wartungskosten aus dem Personalbedarf der Anlage sowie den Wartungs- und Versicherungsaufschlägen auf den Apparate- und Ausrüstungskosten bestimmt.

Anschließend werden Kostenbilanzen auf den drei Hierarchieebenen Gesamtsystem, Teilsystem und Apparate in Form von Gleichungssystemen aufgestellt und gelöst, um die Gesamtkosten für jedes Element im System zu bestimmen. Der nächste Schritt ist die Berechnung der Bezugsgröße der exergoökonomischen Bewertung, der Basiskosten. Für eine umfassende Bewertung müssen die Basiskosten für jede Hierarchiestufe gesondert bestimmt werden.

Die erste Bezugsebene ist die Gesamtsystemebene, d. h. für alle eintretenden Kostenströme von außen in das Gesamtsystem gilt, dass sie mit ihren Gesamtkosten zur Berechnung der Basiskosten im System verwendet werden. Ein entsprechendes Gleichungssystem wird aufgestellt, das für jeden Strom im System die Basiskosten berechnet, wie es in Abschnitt 3.2.4 beschrieben wurde. Die zweite Basiskostenebene ist für die Bewertung der Elemente eines Teilsystems notwendig. Folglich werden für alle in ein Teilsystem von außen oder von anderen Teilsystemen eintretenden Kostenströme die Gesamtkosten angesetzt, um für die Exergieströme innerhalb des Teilsystems Basiskosten zu bestimmen. Die letzte Bezugsebene ist die Apparateebene, wobei hier die bereits ermittelten Gesamtkosten als Basiskosten in den Bilanzraum eintreten und zur Ermittlung der Basiskosten der Produktströme genutzt werden.

Im Anschluss an die hierarchische Basiskostenbestimmung erfolgt die exergoökonomische Bilanzierung für jeden Bilanzkreis des Systems. Im Rahmen der Bilanzierung wurden der Kostentransit, die Feedkosten, die Produktkosten und die Exergieverlustkosten für das Gesamtsystem, die Teilsys-

teme und die Apparate bestimmt. Zur Evaluierung der exergoökonomischen Effektivität wurde für jeden Bilanzraum

- der Zusatzkostengrad,
- die Anteile an den Zusatzkosten,
- der exergoökonomische Wichtungsfaktor und
- der Zusatzkostenbeitrag

berechnet. Es wurde berücksichtigt, dass zur exergoökonomischen Bewertung die Basiskosten in Abhängigkeit von der Hierarchieebene verwendet wurden. Mit dieser Vorgehensweise wurden die nachfolgenden Anwendungsbeispiele berechnet und bewertet.

4.2 Vergasungsanlage für Abfallstoffe der Papierindustrie

Das nachfolgend vorgestellte Verfahren zur energetischen Nutzung von Abfallstoffen ist eine realisierte Pilotanlage, die die Verwertung von Abfällen aus der Recyclingpapierherstellung demonstrieren soll. Nach der Vorstellung des Verfahrens werden die Resultate der exergetischen und exergoökonomischen Analyse diskutiert und interpretiert [HEB06].

4.2.1 Verfahrensbeschreibung

Das Anlagenkonzept wird durch die Eigenschaften des zu verwertenden Abfallstoffs und durch die gewünschten Produkte Elektroenergie und Prozesswärme bestimmt.

Die Haupteinsatzstoffe, die so genannten Spuckstoffe, sind als ein heterogenes Feststoffgemisch charakterisierbar und enthalten Holzstücke, Papier- und Pappereste, Polyethylen-Folie und andere Kunststoffe, Textilreste sowie eine Metallfraktion. Der feuchte Abfallstoff weist einen Wassergehalt von ca. 40 % auf. Vom Einsatzstoff wird ein Heizwert von mindestens 8600 kJ/kg gefordert, damit ein genügend großer Energieeintrag in die Anlage gewährleistet ist. Die im Verfahren benötigte Elektroenergie wird als Eigenbedarf von der erzeugten Bruttoelektroenergieleistung bereitgestellt.

Aufgrund der Spezifik des Haupteinsatzstoffes werden 5 Hauptverfahrensschritte benötigt, um über die thermische Vergasung die gewünschten Endprodukte zu erzeugen. Diese Verfahrensstufen bilden gleichzeitig die Teilsysteme in der hierarchischen Systemstruktur, wie Abbildung 4.2 illustriert (siehe auch Anhang 9).

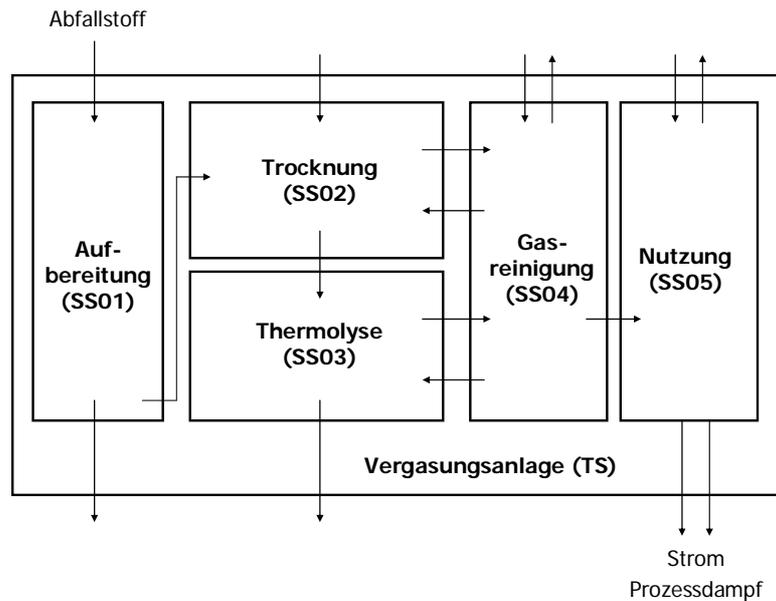


Abbildung 4.2: Schema der Vergasungsanlage

Das erste Teilsystem dient der Aufbereitung der Abfallstoffe, die zerkleinert und von metallischen Bestandteilen getrennt werden. Die Entfernung von Feuchte aus dem Abfallstoff durch Trocknungsumluft, die durch Wärmeaustausch aus dem heißen Produktgas vorgewärmt wird, ist Hauptprozess des zweiten Teilsystems. Der eigentliche thermische Prozess findet im Teilsystem 3 statt, wo die Umsetzung des Abfallstoffs erfolgt. Die Gasaufbereitung und die Vorwärmung der Vergasungsluft werden im vierten Teilsystem realisiert. Die Nutzung des gereinigten Gases durch Verbrennung im Dampferzeuger und die Gewinnung von Elektroenergie und Prozessdampf erfolgen in Teilsystem 5.

Tabelle 4.1: Eckdaten der Vergasungsanlage

	Massenstrom [t/h]	Leistung [MW]
Spuckstoffe	2	6,8
Brenngas	3,7	6
Prozessdampf	9	5
Elektroenergie brutto	-	0,8
Elektroenergie netto	-	0,6

Die Anlage ist einsträngig ausgeführt und kann bis maximal 5 t Abfallstoff pro Stunde verarbeiten. Die Hauptverfahrensschritte bzw. die Teilsysteme können weiter untergliedert werden. Auf der Hierarchieebene der Apparate (Schema siehe Abbildung im Anhang 9) soll im Folgenden eine detaillierte Anlagenbeschreibung gegeben werden.

Im ersten Teilsystem werden die Spuckstoffe aus dem Lager entnommen und auf den Grobschredder gegeben, in dem eine Zerkleinerung erfolgt. An den Schredder schließt sich ein Magnetabscheider an, der einen großen Teil der metallischen Bestandteile aus dem Stoffstrom aussondert und in einen Sammelbehälter befördert. Die Spuckstoffe werden mittels Förderband dem Annahmefräsdoseur zugeführt, der eine weitere Zerkleinerung und nochmalige Abscheidung von Metallbestandteilen realisiert. Durch das drehzahlstellbare und reversierbare Einzugsband, welches die Spuckstoffe in Richtung des Fräsrotors fördert, kann ein kontinuierlicher Stoffstrom eingestellt werden. Der Zerkleinerung schließt sich ein Magnetaustragsband an, das mit einem Anstiegswinkel von 30° montiert ist und metallische Bestandteile auf dem Band fixiert. Die aufbereiteten Spuckstoffe werden mit einem Wurfgebläse aufgesaugt und pneumatisch in den Kopf des Doppelbodentrockners gefördert, während die metallischen Komponenten in einen Sammelbehälter gelangen.

Die Trennung des Fördergutes von der Förderluft erfolgt durch einen zyklonartigen Eintrittsbereich im Doppelbodentrockner im zweiten Teilsystem. Durch eine zentrifugale Abscheidung wird der Spuckstoff auf dem oberen Boden verteilt. Der Doppelbodentrockner ist in zwei Schichten unterteilt: Der obere Boden (Bunkerschicht) dient als Speicher für den thermischen Anlagenteil und realisiert die Erwärmung und Vortrocknung der Spuckstoffe. Der Bunkerboden ist ebenso wie der Trocknerboden, der den unteren Teil des Doppelbodentrockners darstellt, als Profilwalzboden ausgeführt und übergibt das Gut in Abhängigkeit von der eingestellten Drehzahl an die Trocknungsschicht. Die Trocknung erfolgt mit Umluft, die mit einem Wärmeübertrager, der mit dem Wärmeträger Thermalöl arbeitet, auf etwa 150 °C erwärmt wird. Die dazu notwendige Wärme wird dem gebildeten Brenngas in einem Abhitzekegel entzogen. Der Luftherhitzer ist als Wärmetauscherregister ausgeführt, wobei die Nenntemperatur des Thermalöls im Vorlauf ca. 200 °C beträgt. Zusätzlich zur Umluft wird Frischluft zugemischt und Luft durch die pneumatische Förderung in den Doppelbodentrockner eingebracht. Die Umluft wird in der Mitte des Trockners zugeführt und durchströmt sowohl die Bunkerschicht als auch die Trocknerschicht. Ein entsprechender Teilstrom an Trocknungsluft wird als Abluft abgezogen und zusammen mit Frischluft zur Pyrolyse und Vergasung verwendet. Das trockene Gut, das eine Temperatur von ca. 65 °C besitzt, wird mit einem Ausräumer aus dem Trockner entnommen und gelangt über ein Förderband in die Stopfschnecke des Thermolysereaktors.

Der Thermolysereaktor in Teilsystem 3 ist in zwei Reaktionsstufen untergliedert. Die Stopfschnecke befördert die Abfallstoffe zunächst in die Thermolysetrommel, die als liegendes Gefäß mit einem zentralen Rotor ausgestattet ist. Im unteren Bereich des Behälters befinden sich die Eintrittskanäle, durch die die vorgewärmte Prozessluft einströmt. Die Vorwärmung wird durch die Nutzung der Abwärme des Zyklons mittels einer Ringummantelung sowie durch Zumischung von Trocknerabluft realisiert. Für Anfahr- und Stützbetrieb ist der Einsatz des Kanalbrenners vorgesehen, der mit Propangas betrieben wird. Die warme Prozessluft mit einer Temperatur von 500 bis 600 °C trägt thermische Energie sowie Sauerstoff ein, was die exotherme Umsetzung der Spuckstoffe und deren Aufheizung auf 450 bis 650 °C ermöglicht. Dadurch werden die organischen Bestandteile instabil und durch deren Aufspaltung bilden sich Pyrolysegase und feste Pyrolyseprodukte, die im Gleichstrom mit Hilfe der Rührflügel durch die Kammer bewegt werden. Der darauf folgende Vergaser ist als Ringspaltvergaser ausgeführt, in dem das tangential eintretende Gas-Feststoff-Gemisch mit dem durch einen konzentrischen Ringspalt eintretenden Prozessluftstrom gemischt wird. Bei einer Prozesstemperatur von 800 – 1000 °C wird der Pyrolysekoks vergast und der Kohlenwasserstoffanteil des Pyrolysegases gespalten. Die im unteren Teil des Vergasers anfallenden gröberen Feststoffpartikel werden aus dem Apparat ausgeschleust und dem Reststoffsammler zugeführt, der eine Rückführung in die Pyrolysetrommel gewährleistet.

Die feineren Feststoffe gelangen auf Grund der hohen Gasgeschwindigkeit mit dem Gastrom in den Heißgaszyklon im Teilsystem 4 und werden dort im Wesentlichen abgeschieden. Am Zyklonfuß befindet sich ebenfalls ein Ausschleusssystem, das die anfallende Asche in den Reststoffsammler fördert. Das heiße, entstaubte Rohgas, das noch eine Temperatur von ca. 750 °C aufweist, wird in einem Abhitzekeessel, in dem das bereits erwähnte Thermalöl für die Umluftaufheizung erwärmt wird, auf eine Temperatur von 300 bis 400 °C abgekühlt. Das Rohgas wird vom Saugzug, der in dem gesamten Anlagenbereich ab Pyrolysetrommel für Unterdruck sorgt, angesaugt und für das Durchströmen der Wäsche verdichtet. Das Gas strömt in den Kopf des Kompaktgaswäschers, in dem zwei Waschstufen realisiert werden, ein. Die erste Stufe stellt der Strahlwäscher dar, der das Rohgas im Gleichstrom mit dem Kreislaufwaschwasser auf etwa 80 bis 100 °C quenscht. Zugleich wird noch vorhandener Reststaub abgeschieden und eine Grobwäsche realisiert. In einem zweiten Verfahrensschritt wird der Gasstrom umgelenkt und einer Gegenstromwäsche in einer berieselten Füllkörperschicht unterworfen. Zur Entfernung der sauren Bestandteile, wie etwa Schwefel und Chlor, wird dem Waschwasserkreislauf Natronlauge zugesetzt. Das verschmutzte Kreislaufwaschwasser wird aufbereitet und die anfallende Feststoffsuspension wird zur Pyrolysetrommel zurückgeführt. Das gereinigte Brenngas verlässt den Wäscher durch einen Tropfenabscheider. Das Nutzgas kann man als Schwachgas charakterisieren, da es folgende Zusammensetzung (Hauptbestandteile in

Volumenprozent bezogen auf trockenes Gas) aufweist: Stickstoff ca. 60%, Kohlendioxid ca. 15%, Kohlenmonoxid ca. 10%, Wasserstoff ca. 10% und Methan 3%.

Für den Normalbetrieb der Anlage wird eine Nutzung des Brenngases zur Deckung des Energiebedarfes der Papierfabrik angestrebt und im fünften Teilsystem realisiert. Das gereinigte Nutzgas strömt nach der Wäsche zusammen mit der erforderlichen Verbrennungsluft in den Dampferzeuger. Die bei der dort erfolgenden Verbrennungsreaktion frei werdende Energie wird vom zugeführten Kondensat, das eine Temperatur von 80 °C hat und auf 40 bar verdichtet wurde, aufgenommen. Es bildet sich überhitzter Dampf mit einer Temperatur von 350 °C. Das Abgas wird mit einer Temperatur von ca. 110 °C an die Umgebung abgegeben. Der entstandene Dampf strömt in eine Gegendruckturbine, wo er bis auf einen Druck von 6 bar entspannt wird. Die Turbine arbeitet mit einem Isentropenwirkungsgrad von 0,8 und determiniert die erzeugte Elektroenergiemenge. Der aus der Turbine austretende Prozessdampf von ca. 160 °C wird bei der Papierherstellung im Betrieb genutzt und anschließend über die Speisepumpe wieder in den Dampferzeuger gefördert.

4.2.2 Ergebnisse der exergetischen Analyse

Bei der Berechnung der Abfallverwertungsanlage wurde von einem stationären Zustand mit einem Durchsatz von 2 t Abfall pro Stunde und einer jährlichen Benutzungsdauer von 5000 h ausgegangen. Der eingesetzte Abfallstoff besteht aus 45 % Holzbestandteilen, 40 % Feuchte, 10 % Inerte und 5 % Polyethylen, so dass sich eine normierte Exergie, die das Verhältnis von spezifischer Exergie zu spezifischer Enthalpie widerspiegelt, von 0,986 ergibt. Bei einem elektrischen Eigenbedarf von ca. 233 kW entstehen in diesem Betriebszustand als energetische Produkte 588 kW Elektroenergie und 5922 kW Prozesswärme [RIE02].

4.2.2.1 Gesamtsystemebene

Die exergetische Analyse der Vergasungsanlage ohne Transitbereinigung zeigt zunächst, dass das gesamte Verfahren sich durch einen exergetischen Gesamtwirkungsgrad von 38 % auszeichnet, d.h. 62 % der eingesetzten Exergie gehen bei den Umwandlungsvorgängen verloren oder werden ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Es stellt sich die Frage, an welchen Stellen des Verfahrens die größten Verluste auftreten und ob und wie sie zu vermeiden sind.

4.2.2.2 Teilsystemebene

Dazu wird als nächster Schritt der hierarchischen strukturierten Analyse die Ebene der Teilsysteme des Verfahrens untersucht. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht, dass die Teilsysteme 3 (Vergasung) und 5 (Nutzung) die größten Beiträge zum Verlustgrad des Gesamtsystems liefern. Wie eine genauere Analyse auf der Apparateebene noch zeigen wird, sind die chemischen Stoffumwandlungen in diesen Verfahrensschritten hierfür verantwortlich, da diese Umwandlungen mit großen Exergieverlusten verbunden sind. Dagegen haben die verbleibenden Teilsysteme einen geringen Einfluss auf die Effektivität des Verfahrens. Insbesondere die Aufbereitung der Einsatzstoffe (Teilsystem 1) ist aus Sicht des gesamten Verfahrens mit unbedeutenden Exergieverlusten verbunden.

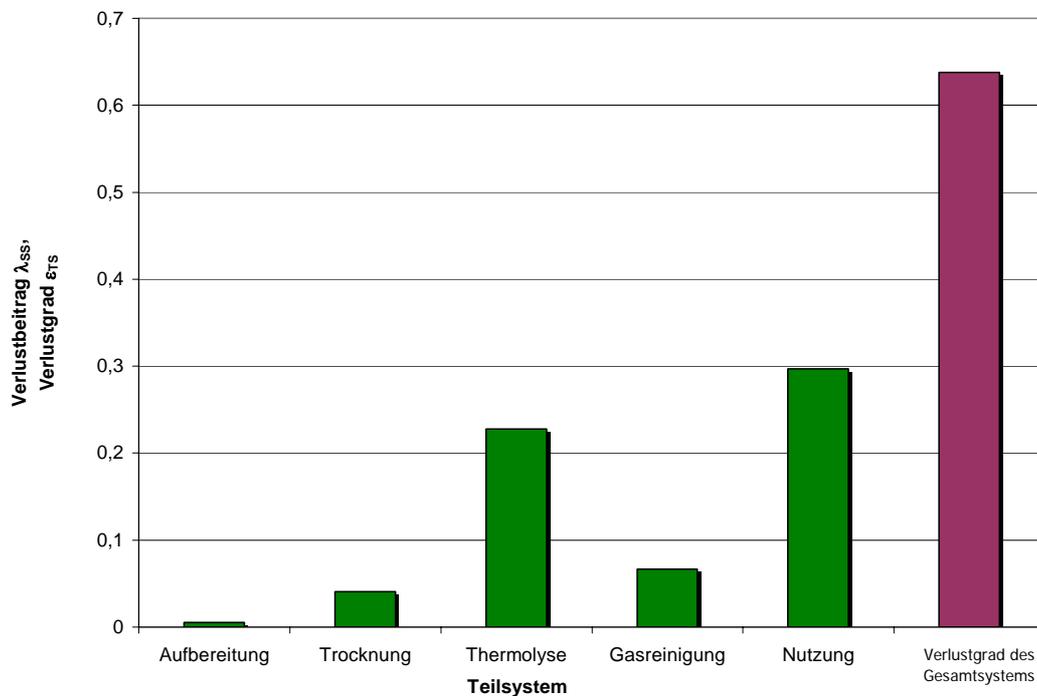


Abbildung 4.3: Verlustbeiträge zum Verlustgrad des Gesamtsystems

In einem nächsten Schritt werden die Einflussgrößen auf den Verlustbeitrag der Subsysteme untersucht. Daher sind in Abbildung 4.4 neben dem Verlustbeitrag auch die exergetischen Kennzahlen Verlustgrad und Wichtungsfaktor auf Teilsystemebene dargestellt.

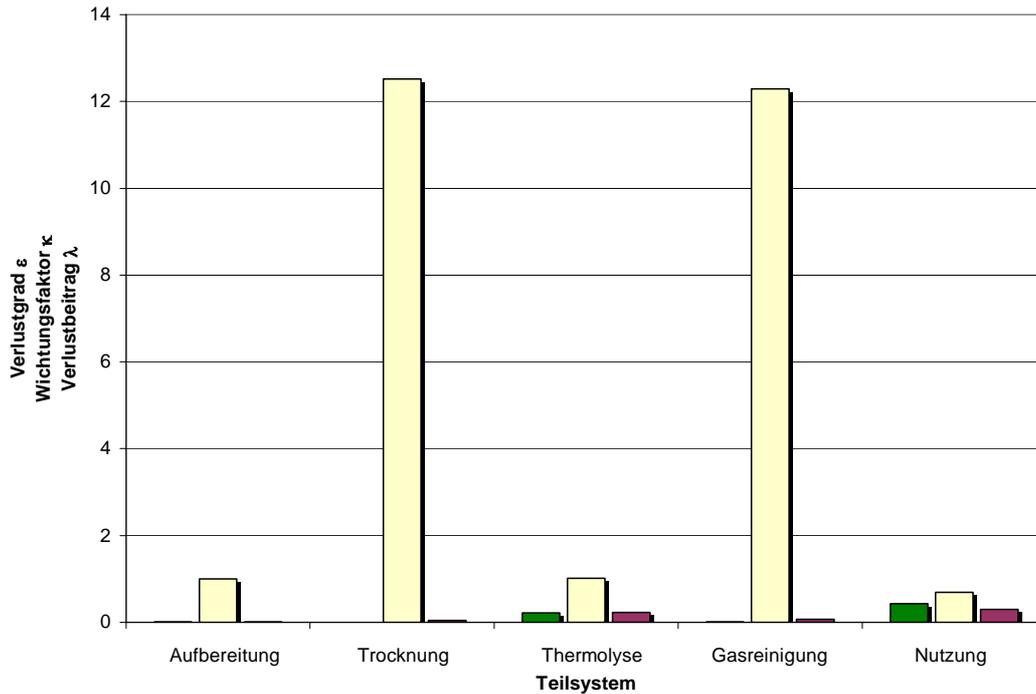


Abbildung 4.4: Exergetische Kennzahlen der Teilsysteme

Das Balkendiagramm zeigt, dass ohne Anwendung einer Form der exergetischen Transitbereinigung kein Vergleich der exergetischen Effektivität der Teilsysteme „Aufbereitung“, „Trocknung“ und „Gasreinigung“ möglich ist, da der Verlustgrad stets nahe null liegt und scheinbar auf reversible Prozessabläufe in diesen Teilsystem hindeutet.

4.2.2.3 Transitbereinigung

Einen großen Einfluss auf die exergetischen Kennzahlen hat die Wahl der Transitbereinigungsvariante. In den nachfolgenden Darstellungen sind die Bewertungsergebnisse für die Varianten „keine Transitbereinigung“, „anteilsorientierte Transitbereinigung“ und „wandlungsorientierte Transitbereinigung“ für die Teilsystemebene der Vergasungsanlage dargestellt.

Der Vergleich der Verlustgrade zeigt, wie durch eine exergetische Transitbereinigung die Bezugsbasis der Kennzahl deutlich verändert wird. Im Teilsystem „Aufbereitung“ werden ohne Transitbereinigung die Exergieverluste auf die gesamte zum Teilsystem eintretende Exergie bezogen. Durch die große chemische Exergie der Spuckstoffe, die aber von den Aufbereitungsprozessen nicht beeinflusst wird, ist das Verhältnis der Exergieverluste zur eintretenden Exergie mit 0,0054 sehr klein. Es scheint, als ob ein reversibler Prozessablauf im Teilsystem realisiert ist. Betrachtet man jedoch bei der Anwendung der wandlungsorientierten Transitbereinigung die im Teilsystem umge-

wandelte Exergie als Feedexergie, so wird der Verlustgrad nur auf die eingesetzte Elektroenergie bezogen. Da bei der Aufbereitung der Spuckstoffe die gesamte Elektroenergie dissipiert wird, ergibt sich ein Verlustgrad von eins. Der transitbereinigte Verlustgrad bildet daher durch den Bezug auf die Feedexergie des Teilsystems die Effektivität der darin ablaufenden Umwandlungsprozesse ab, ohne dass daran nicht beteiligte Exergieströme die Bewertung verzerren.

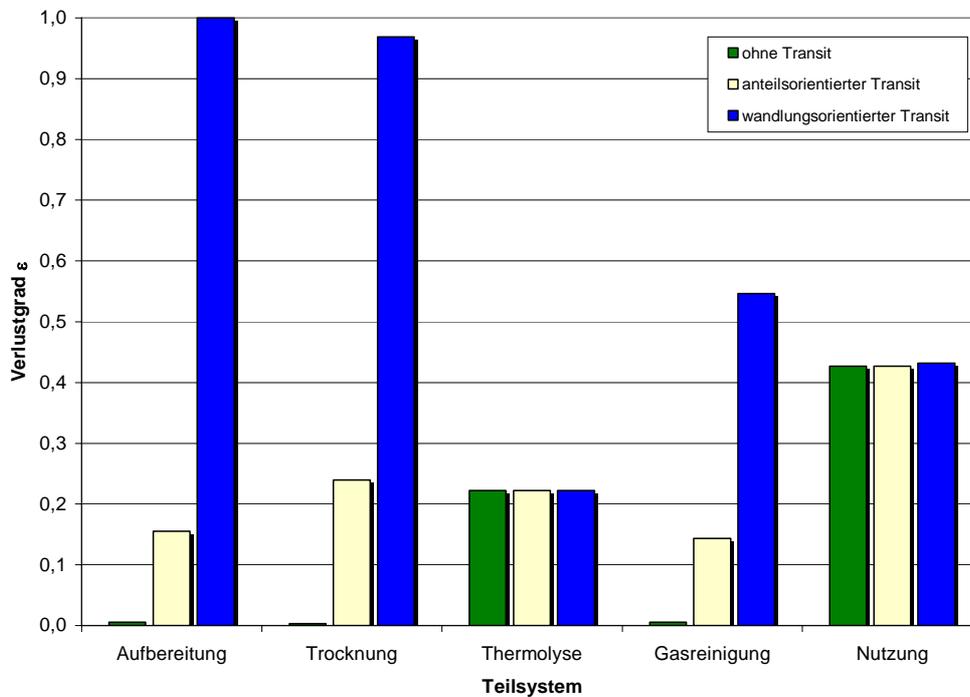


Abbildung 4.5: Verlustgrad in Abhängigkeit von der Transitbereinigung

Wie auch die Verlustgrade des Teilsystems „Trocknung“ belegen, ist die Wahl der Art der Transitbereinigung entscheidend für die Bezugsbasis der Kennzahl. Im unbereinigten Fall werden die Exergieverluste des Teilsystems auf die gesamte eintretende Exergie bezogen und führen zu einem Verlustgrad von nahezu null. Dabei wird jedoch der Exergieverlust des Teilsystems mit der Einbindung der Trocknungsprozesse in das übergeordnete Gesamtsystem verbunden. Da die Prozesse im Teilsystem „Trocknung“ die chemische Exergie der Spuckstoffe und des Wärmeträgeröls nicht beeinflussen, kann diese chemische Exergie bei Verwendung der anteilsorientierten Transitbereinigung als Transitexergie aufgefasst werden. Die dadurch veränderte Bezugsbasis führt zu einem Verlustgrad von 0,2397. Falls nur die umgewandelte Exergie im Teilsystem als Feedexergie betrachtet wird, zeigt sich, dass 96 % dieser Feedexergie bei den Prozessen im Teilsystem verloren gehen. Eine Transitbereinigung findet nicht statt, wenn wie im Teilsystem „Thermolyse“ die gesamte eingesetzte Exergie an der Umwandlung beteiligt ist. In diesem Fall kann für das Teilsystem Pro-

zesse kein Transit definiert werden, so dass der Verlustgrad des Teilsystems von 0,2223 unabhängig von der Art der Transitbereinigung ist.

Für die Bewertung der exergetischen Effektivität der Struktureinheiten des Verfahrens wird der Verlustgrad, der mit Hilfe der wandlungsorientierten Transitbereinigung gewonnen wird, verwendet, da dieser durch den Bezug der Exergieverluste auf die gewandelte Exergie eine Verzerrung der exergetischen Situation vermeidet und eine Interpretation erleichtert.

Die Art der exergetischen Transitbereinigung beeinflusst in umgekehrter Weise auch den Wertebereich des exergetischen Wichtungsfaktors. Wie Abbildung 4.6 zeigt, ergeben sich für den unbereinigten Fall Wichtungsfaktoren von größer als 12 für die Teilsysteme Trocknung und Gasreinigung. Dieser Effekt wird durch das Verhältnis des großen, vor allen von chemischen Anteilen geprägten, Exergiestroms des Wärmeträgeröls zu der eintretenden Gesamtexergie hervorgerufen.

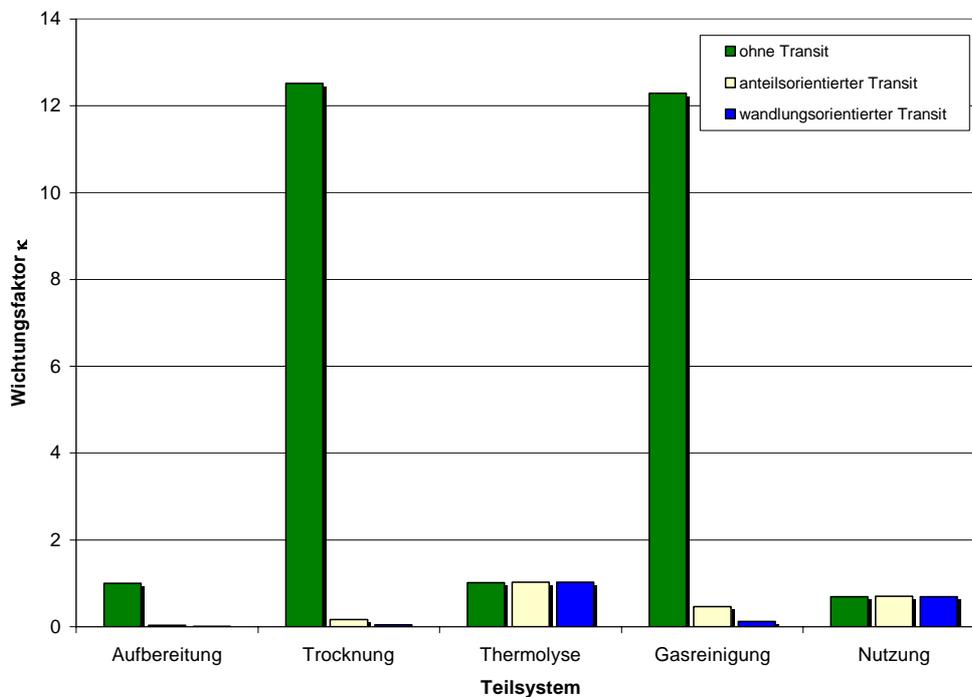


Abbildung 4.6: Wichtungsfaktor in Abhängigkeit von der Transitbereinigung

Die Darstellung zeigt, dass nach der Anwendung der wandlungsorientierten Transitbereinigung die Bedeutung dieser Teilsysteme für die stattfindenden Umwandlungsprozesse im System mit 0,0422 bzw. 0,1218 gering ist, da lediglich physikalische Exergieanteile umgewandelt werden. Weiterhin lässt sich ablesen, dass die Bedeutung des ersten Teilsystems durch die transitbereinigte Analyse sich von einem unbereinigten Wichtungsfaktor von eins, hervorgerufen durch die chemische Exergie der Spuckstoffe, zu einem Wichtungsfaktor von fast null bei der wandlungsorientierten Transitbereinigung verändert und die reale Bedeutung der dort stattfindenden physikalischen Prozesse für

das System eingeschätzt wird. Hingegen bleibt die Bedeutung der Teilsysteme mit chemischer Umwandlung näherungsweise gleich, da hier keine großen Transitexergien definiert werden können. Der Wichtungsfaktor unter Anwendung der wandlungsorientierten Transitbereinigung ist ein Maß für die Bedeutung der Energiewandlung im betrachteten Bilanzraum, da er die umgewandelte Exergie in einer Struktureinheit zu der Feedexergie der nächsthöheren Hierarchiestufe ins Verhältnis setzt. Er vermeidet die Wichtung der Struktureinheiten aufgrund von Transitexergien und wird daher zusammen mit dem transitbereinigten Verlustgrad verwendet.

Ein Blick auf den Vergleich der Verlustbeiträge der Teilsysteme der drei Transitbereinigungsverfahren zeigt keine nennenswerten Unterschiede. Dies ist begründbar durch die geringe Transitexergie, die auf der Ebene des Gesamtsystems definiert werden kann. Letztlich kann nur die relativ geringe physikalische Exergie des eintretenden Kondensates als Transitexergie benannt werden, die im Verhältnis zu der eingesetzten und umgewandelten Exergie der Spuckstoffe unbedeutend für den Prozess ist. Für die Bewertung der Spuckstoffanlage bedeutet dies, dass die oben angegebenen unbereinigten Kennzahlen für das Gesamtsystem mit den transitbereinigten Größen übereinstimmen.

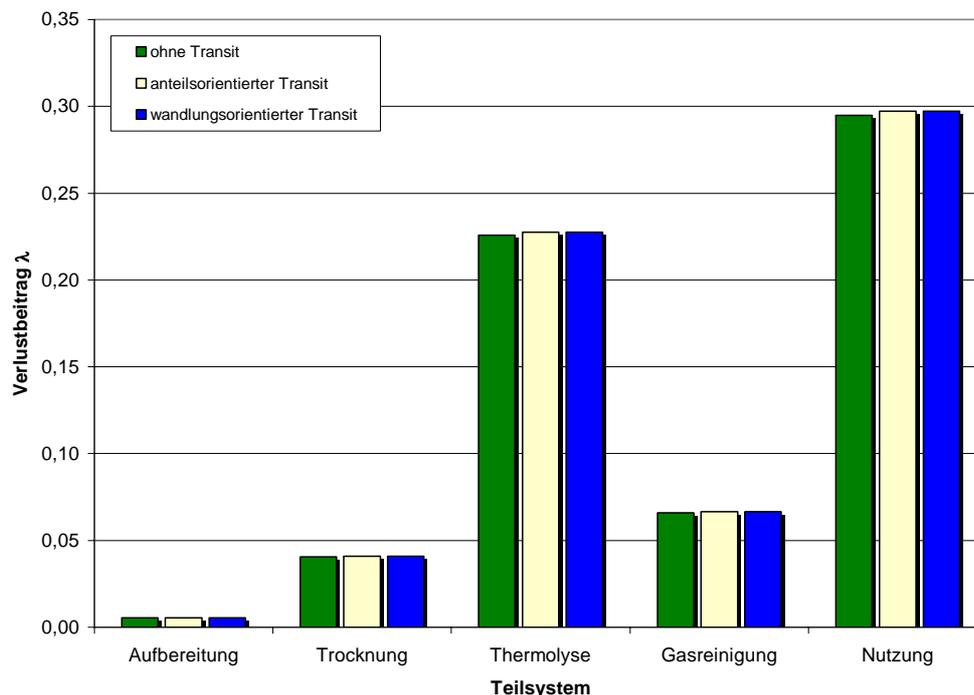


Abbildung 4.7: Verlustbeitrag in Abhängigkeit von der Transitbereinigung

Darüber hinaus zeigt die Darstellung auch, dass in dieser Situation die Verkleinerung der Bezugsbasis des Verlustgrades durch die Transitbereinigung mit einer Verringerung der Wichtung einhergeht, was zu ähnlichen Verlustbeiträgen der Varianten führt. Vorteilhaft an der transitbereinigten

Bewertung ist die Fokussierung auf die tatsächlich umgewandelten Exergien im Bilanzraum. Daher wird im Weiteren den Kennzahlen mit wandlungsorientierter Transitbereinigung der Vorzug gegeben.

4.2.2.4 Apparateebene

Nach der Diskussion der Transitbereinigungsvarianten soll im Folgenden die Analyse der Vergasungsanlage auf der Ebene der Apparate fortgesetzt werden. Im Teilsystem 1 der Vergasungsanlage wird die Aufbereitung der Spuckstoffe in vier Apparaten realisiert, die jeweils einen Verlustgrad von eins aufweisen, da die eingesetzte Elektroenergie der Schredder und der Magnetabscheider vollständig dissipiert wird. Für das Verfahren sind die Apparate jedoch unverzichtbar, da die Zerkleinerung und Abscheidung inerter Bestandteile das Risiko von Störungen im Prozessablauf reduziert. Für die Apparate des Teilsystems lässt sich jeweils keine Produktexergie definieren, da lediglich ein exergetischer Aufwand zur Erreichung des Prozesszieles notwendig ist. In diesem Fall gewinnt der Wichtungsfaktor, der hier die Verteilung des exergetischen Aufwandes im Teilsystem beschreibt, an Bedeutung. Eine Verringerung des Elektronergieeinsatzes der Schredder ist aufgrund ihres Verlustbeitrages anzustreben, lässt sich aber nur durch die Modifikation der Anforderungen an die Güte der geschredderten Spuckstoffe erreichen. Dies hat jedoch wiederum Konsequenzen für die Auslegung der gesamten Fördereinrichtungen der Abfallstoffe bis hin zum Design der Thermolyse.

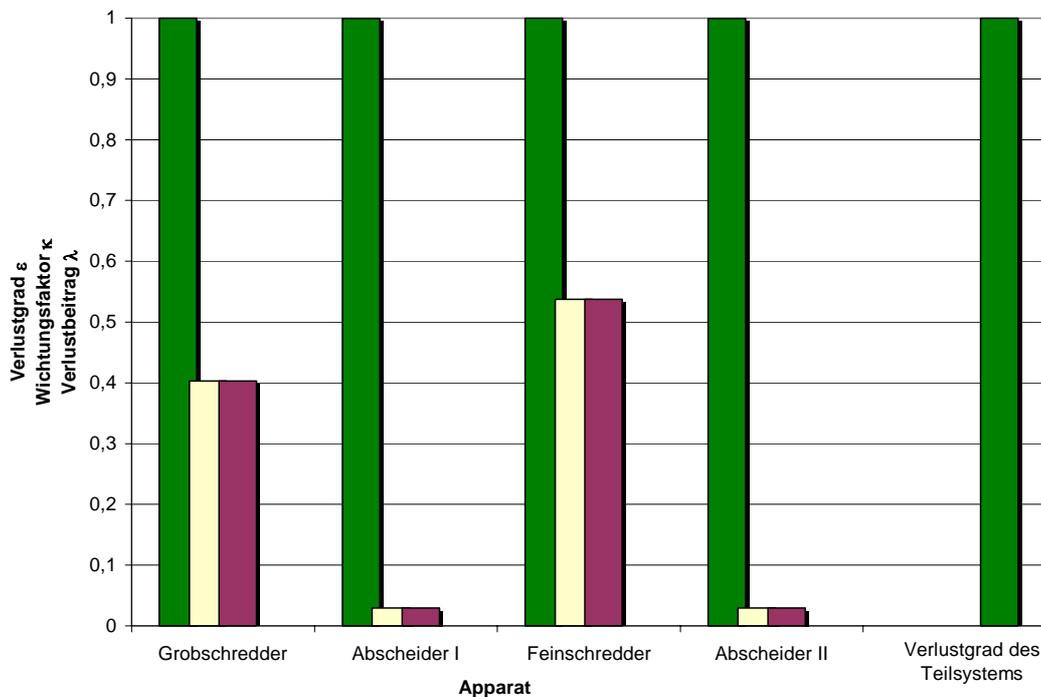


Abbildung 4.8: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Aufbereitung“

Im zweiten Teilsystem wird die Trocknung der Spuckstoffe realisiert. Wie aus der nachstehenden Abbildung 4.9 ersichtlich ist, sind die Mehrzahl der Apparate des Teilsystems durch einen Verlustgrad nahe eins gekennzeichnet, d. h. ein großer Teil der zur Umwandlung zur Verfügung stehenden Exergie wird in den Apparaten dissipiert bzw. ungenutzt nach außen abgegeben. Jedoch weisen die Apparate des Teilsystems mit Ausnahme des Trockners und des Wärmeübertragers einen geringen Verlustbeitrag auf, da ihre Bedeutung für den Verfahrensschritt „Trocknung“ gering ist.

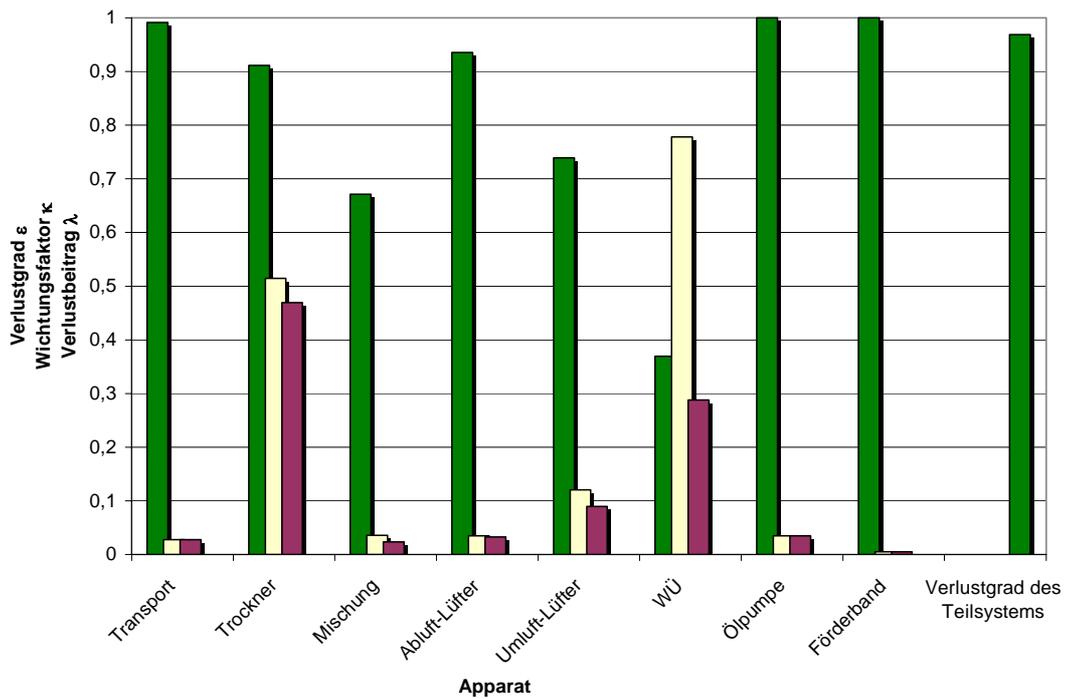


Abbildung 4.9: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Trocknung“

Im Hinblick auf die Analyse der Verlustursachen müssen daher die Apparate Trockner und Wärmeübertrager genauer betrachtet werden, da diese Elemente große Verlustbeiträge von 0,47 bzw. 0,29 zu dem Teilsystemverlustgrad von 0,97 liefern. Im Trockner gehen 91 % der zur Umwandlung zur Verfügung stehenden Exergie verloren. Eine detaillierte Analyse offenbart, dass 77 % der umwandelbaren Exergie beim Trocknungsprozess dissipiert werden. Zur Verdampfung der in den Spuckstoffen gebundenen Feuchte werden Triebkräfte benötigt. Durch die Erwärmung der Umluft nimmt die relative Feuchte der Luft ab, so dass eine Aufnahme von Feuchte bis zur Sättigung möglich ist. Exergetische Verluste treten auf, da zum einen dieser Gleichgewichtszustand bei der Trocknung nicht erreicht wird und drüber hinaus die Spuckstoffe durch die Trocknungsluft aufgeheizt werden, wobei Temperaturdifferenzen von bis zu 120 K auftreten. Eine Verringerung der Verluste ist möglich: Die Verringerung der Triebkräfte bei gleich bleibenden Anforderungen an die Restfeuchte im Gut lässt sich mit einer vergrößerten Trocknungsfläche oder einem erhöhten

Umluftstrom ausgleichen. Ersteres erhöht den apparativen Aufwand der Trocknung, während die zweite Maßnahme einen zusätzlichen Exergieaufwand für den Transport aufgrund erhöhter Druckverluste verursacht. Eine weitere Möglichkeit ist, nur mit erwärmter Frischluft zu trocknen. Dies würde die erforderliche Luftmenge senken, da keine mit Feuchte beladene Trocknerabluft zugemischt wird, jedoch treten große Exergieverluste durch die Abluft auf, falls diese aufgrund ihres Temperaturniveaus nicht zur Regeneration im System genutzt wird. Eine Absenkung der Anforderungen an die Restfeuchte im Spuckstoff verringert zwar den Trocknungsaufwand, wirkt sich jedoch negativ auf den Thermolyseprozess aus.

Etwa 14 % der Verluste werden durch die Trocknungsabluft verursacht. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um einen indirekten äußeren Exergieverlust, da die Abluft des Trockners noch durch weitere Elemente der Gesamtanlage strömt. Jedoch ist der Trockner als der verursachende Apparat mit den Verlusten zu belasten, da die darauf folgenden Elemente, die von der Abluft durchströmt werden, keinen Einfluss auf die an der Systemgrenze auftretenden Exergieverluste nehmen können.

Die Verluste des Wärmeübertragers von 37 % sind im Wesentlichen der Temperaturdifferenz zwischen dem heißen Wärmeträgeröl und der Umluft des Trocknungsprozesses geschuldet. Diese Exergieverluste resultieren aus den unterschiedlich großen Wasserwerten der Medien. Die Wasserwerte können durch die Erhöhung der Luftmenge angeglichen werden. Jedoch hat diese Maßnahme, wie bereits oben beschreiben, eine Erhöhung der Exergieverluste durch die Förderung der Luft zur Folge.

Bei der Pyrolyse und Vergasung der Spuckstoffe in Teilsystem 3 (siehe Abbildung 4.10) entsteht ein Nutzgas, das nur noch ca. 80 % der eingesetzten Exergie enthält. Dies resultiert aus der Abwertung eines Teils der Brennstoffexergie in thermische Energie des Gases. Durch die Verfahrenswahl der Verwertung über die Vergasung sind derartige Verluste unvermeidlich. Im Vergleich zur Verbrennung treten jedoch geringere Verluste auf, da das Produktgas ein hochwertiger Energieträger mit einer normierten Exergie von 0,95 ist. Da der äußere Verlustgrad der Pyrolyse und Vergasung lediglich 0,01 beträgt, besteht auch hier kein wesentliches Verbesserungspotential.

Dass die Vergasung der Spuckstoffe den zentralen Prozess des Teilsystems darstellt, zeigen der Wichtungsfaktor von 1,0037, der außerdem die Kreislaufführung von Reststoffen im Teilsystem dokumentiert, und der Verlustbeitrag von 0,2216 bei einem Verlustgrad des Teilsystems von 0,2223. Die Exergie der Spuckstoffe bzw. des Brenngases ist wesentlich größer als die der Reststoffe, so dass die Rückführung dieser Stoffe in die Pyrolysekammer zur Umsetzung noch unvergaster Bestandteile einen sehr geringen Verlustbeitrag von 0,0007 aufweist. Der Kanalbrenner ist für den Anfahrbetrieb vorgesehen und im betrachteten stationären Zustand nicht von Bedeutung.

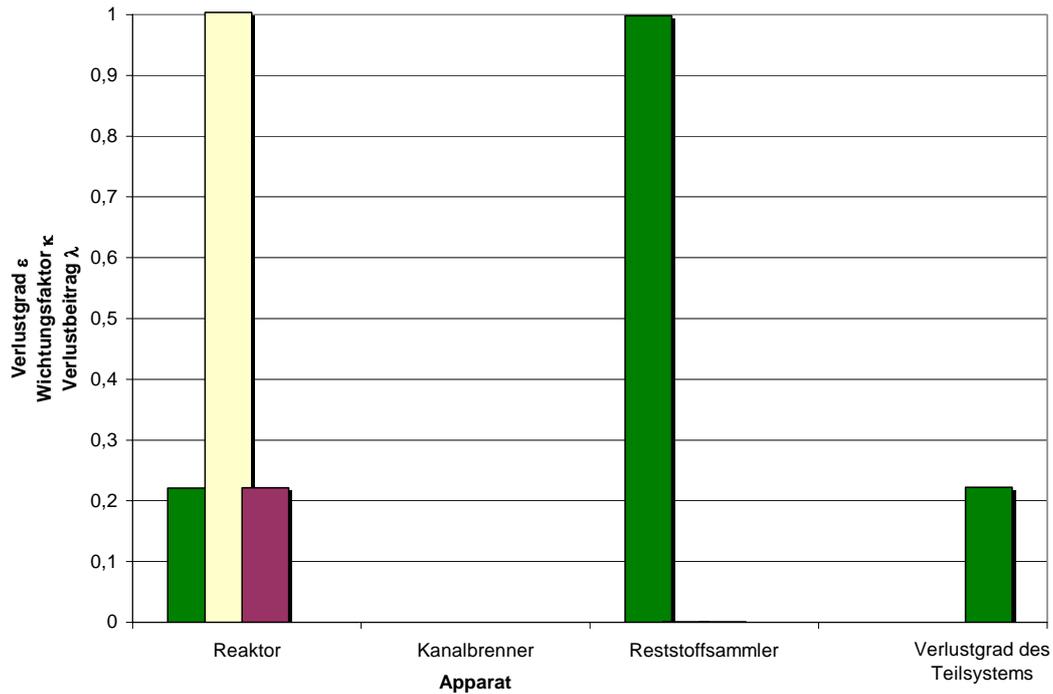


Abbildung 4.10: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Vergasung“

Das vierte Teilsystem enthält die Apparate zur Gasaufbereitung, die noch im Nutzgas enthaltene unerwünschte Bestandteile entfernen und thermische Energie des Gases zur Vorwärmung der Vergasungsluft auskoppeln.

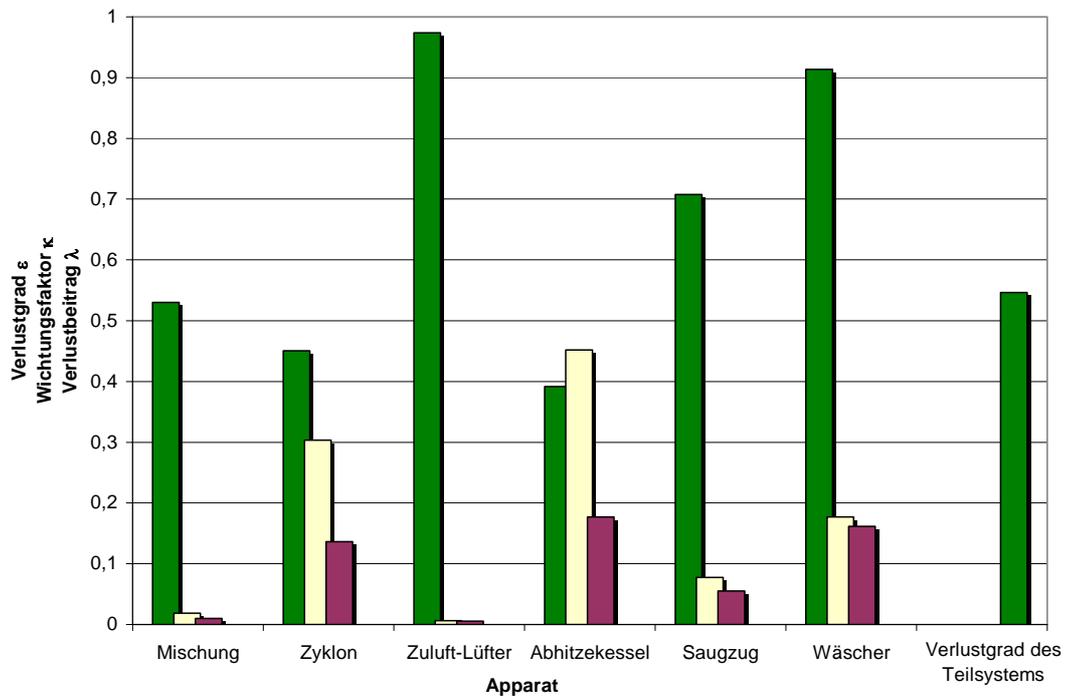


Abbildung 4.11: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Gasreinigung“

Wie in Abbildung 4.11 gezeigt wird, weisen alle Apparate hohe Verlustgrade auf, so dass die Wichtungsfaktoren einen entscheidenden Einfluss auf die teilsystembezogene Bewertung haben. Daher weisen die Apparate „Zyklon“, „Abhitzeessel“ und „Wäscher“ die größten Verlustbeiträge auf. Die Verlustbeiträge der Mischstelle von 0,0100 und des Frischluft-Gebläses mit 0,0058 unterstreichen den geringen Anteil der Verluste im Teilsystem.

Im Wäscher wird das noch heiße Brenngas im Gegenstrom gewaschen und dadurch technologiebedingt von über 300 °C auf ca. 80 °C abgekühlt. Die Wäsche ist notwendig, um den Schadstoffgehalt des Brenngases zu senken. Eine Verbesserung der Effizienz ist durch eine zusätzliche Wärmeauskopplung aus dem Brenngas möglich, da so die Temperaturdifferenz im Wäscher verringert werden kann. Allerdings ist dies mit einem zusätzlichen apparativen Aufwand verbunden. Dieser ist sicherlich gerechtfertigt, wenn die Niedertemperaturwärme im Verfahren oder extern genutzt werden kann.

In der Verbrennung sowie in der Wärmeübertragung von den heißen Rauchgasen an den entstehenden Dampf liegen die exergetischen Verluste des Dampferzeugers im Teilsystem 5 begründet. Das in der Thermolyse erzeugte Brenngas wird oxidiert und das entstehende Rauchgas mit 110 °C an die Umgebung abgegeben, wodurch äußere Verluste verursacht werden. Durch die irreversiblen Prozesse der Verbrennung, die nach erfolgter Verfahrenswahl unvermeidlich sind, weist der Dampferzeuger auch den größten Anteil am Verlust des Teilsystems auf.

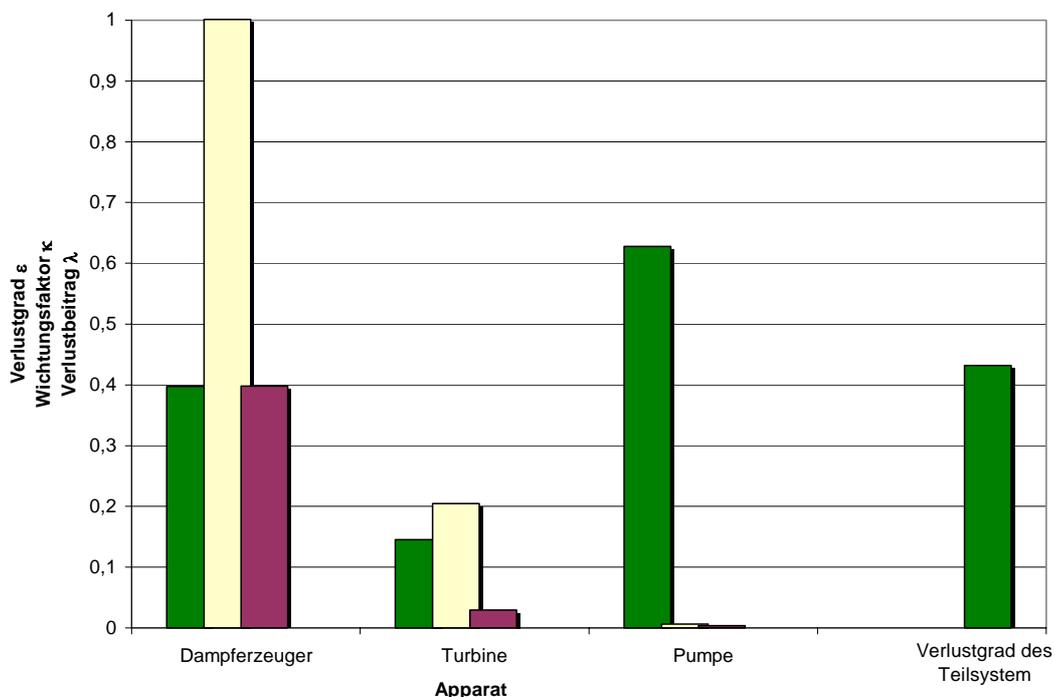


Abbildung 4.12: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Nutzung“

Die Turbine und die Speisewasserpumpe haben nur einen geringen Anteil an den Exergieverlusten im fünften Teilsystem. Folglich muss eine Prozessverbesserung beim Dampferzeuger ansetzen. Neben den unvermeidlichen Exergieverlusten durch die Verbrennung, lassen sich die Exergieverluste durch das Temperaturniveau des Frischdampfes beeinflussen. Durch eine Erhöhung der Frischdampfparameter würde die Abwertung der Exergie des Brenngases verkleinert. Dem gegenüber stehen die zusätzlichen Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe für den Verdampfer und Überhitzer, da von der Anwesenheit korrosiver Bestandteile im Gas ausgegangen werden muss. Die äußeren Verluste durch die hohe Abgastemperatur sind ebenfalls unvermeidlich, da eine Kondensation von Rauchgasbestandteilen im Kamin verhindert werden soll.

4.2.2.5 Exergieströme

Neben der Analyse der Elemente des Verfahrens können auch die Relationen, d. h. die Exergieströme, mit Hilfe des Basisexergiefaktors bewertet werden. In Abbildung 4.13 sind alle Exergieströme des Systems eingetragen, wobei versucht wurde, die Ströme möglichst in der Reihenfolge ihres Auftretens im Prozess zu ordnen.

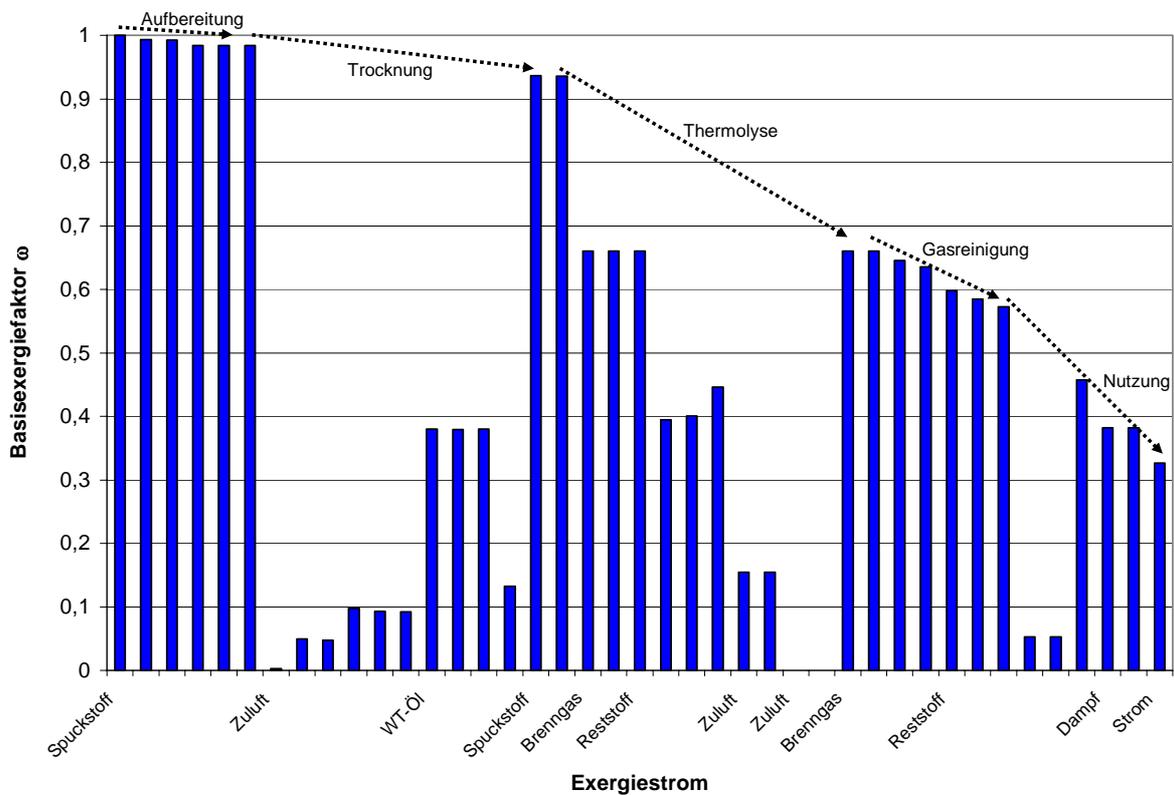


Abbildung 4.13: Basisexergiefaktoren der Ströme

Der eintretende Spuckstoff weist einen Basisexergiefaktor von eins auf, da er noch keine Umwandlungen im System durchlaufen hat und folglich die Basisexergie mit der Totalexergie übereinstimmt. Die exergetischen Verluste im Verfahrensschritt „Aufbereitung“ zeigen sich durch eine kontinuierliche Abnahme dieses Faktors bis auf 0,984 am Austritt aus dem Teilsystem. Interessant ist die Entwicklung des Faktors im Teilsystem „Trocknung“: Die Zuluft mit einem Basiskostenfaktor von 0,003 und die Spuckstoffe führen im Trockner zu Abluft mit einer entsprechenden Kennzahl von 0,049 und Umluft mit 0,098. Diese Umluft-Kennzahl sinkt durch die Zumischung von Umgebungsluft und durch den Transport auf 0,092, bevor im Wärmeübertrager das Wärmeträgeröl, das ein Basisexergie-Totalexergie-Verhältnis von ca. 0,4 aufweist, genutzt wird. Dadurch ergibt sich für die aufgeheizte Umluft ein Basisexergiefaktor von 0,132. Aufgrund der Verluste bei der Trocknung und der dazugehörigen Prozesse in Teilsystem 2 nimmt der Basisexergiefaktor der Spuckstoffe ab, so dass er am Austritt aus dem Teilsystem 0,936 beträgt.

Die Thermolyse ist ein verlustreicher Prozess, so dass die Kennziffer weiter sinkt und die Exergie des Brenngases nur noch 66 % der zur Erzeugung aufgewendeten Exergie umfasst. In der Gasreinigung nimmt der Basisexergieanteil aufgrund der auftretenden Verluste kontinuierlich weiter ab, was zu einem Basisexergiefaktor nach der Gaswäsche von 0,635 führt. Auch die Verbrennung im Teilsystem 5 verursacht große exergetische Verluste, so dass für die reversible Erzeugung der Produktexergien letztlich nur etwa ein Drittel der aufgewandten Exergie im System notwendig ist. Dies demonstriert auch deutlich den Zusammenhang mit dem Wirkungsgrad, der 36 % beträgt. Die gewünschten Endprodukte der diskutierten Anlage sind Prozessdampf, der einen Basisexergiefaktor von 0,38 aufweist und Elektroenergie, die sich durch einen entsprechenden Faktor von 0,33 charakterisieren lässt. Diese Resultate zeigen, dass die Erzeugung von exergetisch hochwertiger Elektroenergie mit dieser Anlage hohe Verluste verursacht. Nur 33 % der zur Erzeugung dieses Exergiestromes eingesetzten Exergie würden bei idealer reversibler Prozessführung benötigt.

Mit dieser Strombetrachtung lassen sich daher ebenfalls die Verlustursachen im System herausarbeiten und für eine Flussdarstellung, wie sie in Abbildung 4.14 dargestellt ist, nutzen. Im Flussbild, das die Ebene der Teilsysteme zeigt, kennzeichnet die Breite der Flüsse die Totalexergie. Dadurch lässt sich der Abbau der eingesetzten Exergie der Spuckstoffe beim Durchlauf durch das Verfahren erkennen, da der Basisexergieanteil an der Totalexergie hervorgehoben ist. Es zeigt sich auch hier, dass die Produktströme, die das Teilsystem „Nutzung“ verlassen, nur noch ein Drittel der ursprünglich eingesetzten Exergie am Eintritt in das System enthalten.

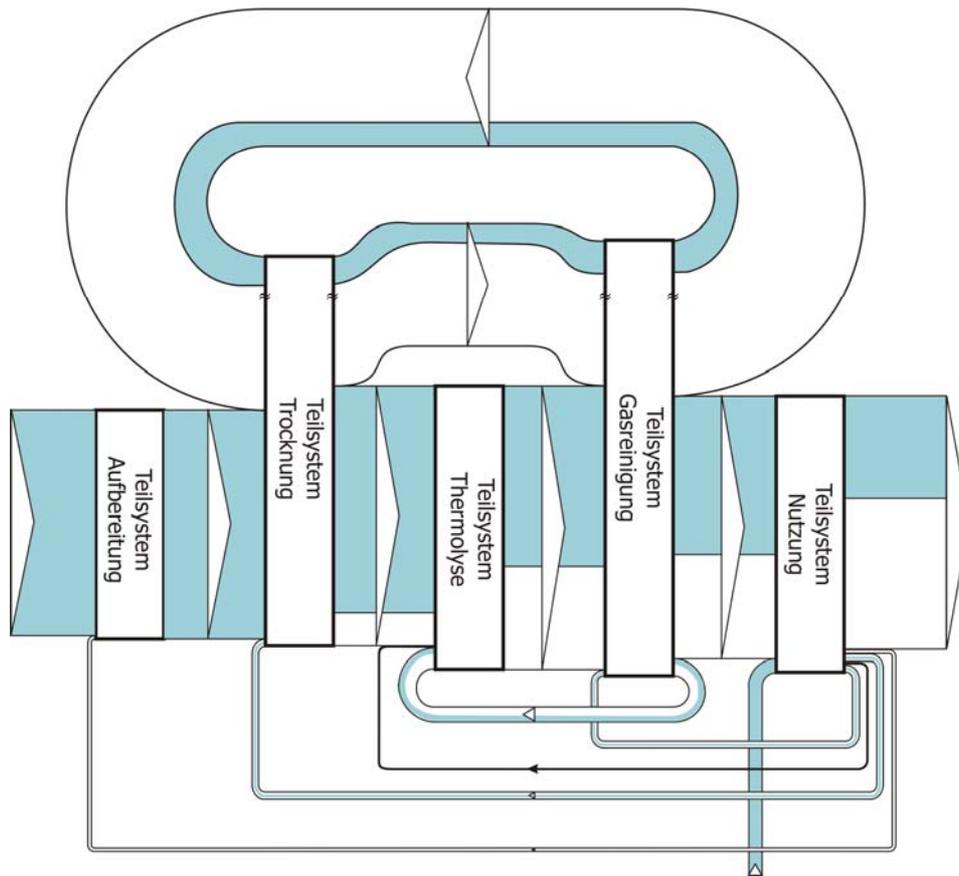


Abbildung 4.14: Exergetisches Flussbild auf Teilsystemebene

Gleichzeitig wird auch verdeutlicht, dass in den Teilsystemen „Thermolyse“ und „Nutzung“ die größten exergetischen Verluste verursacht werden, da dort jeweils die Basisexergie im Vergleich zum Eintritt erheblich abnimmt.

Es lässt sich konstatieren, dass bereits durch die Zielstellung des Verfahrens Exergieverluste vorgezeichnet sind, da der zu erzeugende Prozessdampf einen CARNOT-Faktor von nur 0,32 besitzt und damit eine Abwertung der Exergie des Einsatzstoffes einhergeht. Durch die Wahl des Verbrennungsprozesses und die Erzeugung der Elektroenergie über einen Dampf-Kraft-Prozess sind ebenfalls Exergieverluste unvermeidlich.

4.2.3 Ergebnisse der exergoökonomischen Analyse

Im Anschluss an die exergetische Bewertung der Vergasungsanlage können unter Einbeziehung von ökonomischen Randbedingungen Aussagen zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens getroffen werden. Neben den Resultaten der exergetischen Analyse wurden folgende Parameter in die Berechnung einbezogen:

- eine jährliche Benutzungszahl von 5000 h/a,

- eine Eigenkapitalquote von 50 %,
- ein Zinssatz zur Finanzierung von 8 % und
- eine Nutzungsdauer von 12 Jahren.

Für den Betrieb der Anlage werden 9 Beschäftigte benötigt. Die Wartungskosten der Anlage werden mit einem 1,5%igen Aufschlagsatz auf die Investitionskosten bestimmt. In ähnlicher Weise, mit einem 0,5%igen Aufschlag auf die Investitionskosten, werden die Versicherungskosten der Anlage einbezogen. Der Abfallstoff steht in der Modellrechnung zu einem Preis von 1 Cent pro kWh Exergie zur Verfügung.

4.2.3.1 Gesamtsystemebene

Unter diesen Randbedingungen ergeben sich für das gesamte Verfahren Exergiekosten in Höhe von 342 000 EUR pro Jahr, Investitionskosten im Umfang von 745 000 EUR pro Jahr sowie Personal- und Wartungskosten von 618 000 EUR pro Jahr. Dies führt zu den Gesamtkosten des Verfahrens im Umfang von 1 705 000 EUR pro Jahr, die von den Produkten Elektroenergie und Prozessdampf zu tragen sind.

Mit diesen Gesamtkosten allein, die zudem nur auf der Ebene des Gesamtsystems in aggregierter Form vorliegen, lässt sich keine detaillierte Bewertung ableiten. Erst durch die Berechnung der Basiskosten und der Gesamtkosten für jeden Strom im System können Aussagen über die Kostenentstehung und die Kostenursachen getroffen werden. Die Berechnung liefert für die Ebene des Gesamtsystems bedingt durch die Exergieverlustkosten, die Investitionskosten sowie die Personal- und Wartungskosten einen Zusatzkostengrad von 92,7 %. Dies heißt, dass lediglich 7,3 % der Gesamtkosten des Verfahrens bei den gegebenen ökonomischen Rahmenbedingungen naturgesetzlich unvermeidbar sind.

4.2.3.2 Teilsystemebene

Der hohe Zusatzkostengrad wirft die Frage auf, wo und wodurch diese immensen Zusatzkosten im System hervorgerufen werden. In der nachfolgenden Abbildung werden die gesamten Zusatzkosten durch die Zusatzkostenbeiträge der Teilsysteme und durch die Gemeinkosten repräsentiert, so dass eine genauere Zuordnung möglich ist.

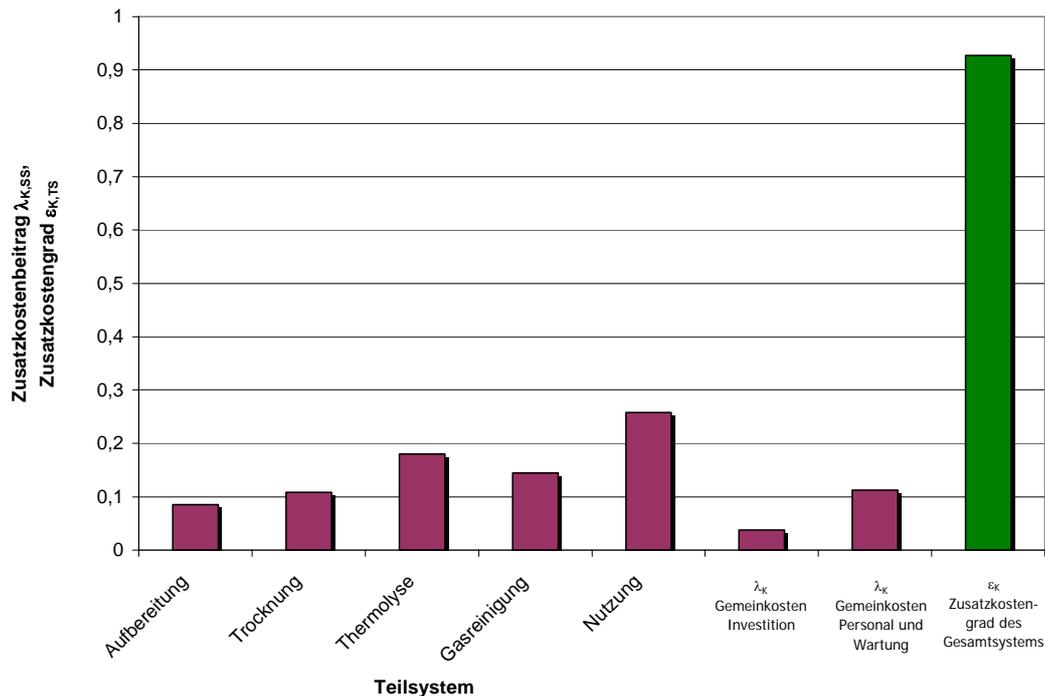


Abbildung 4.15: Zusatzkostenbeiträge zum Zusatzkostengrad des Gesamtsystems

Es zeigt sich, dass die größten Beiträge in den Teilsystemen 3 (Thermolyse) und 5 (Nutzung) zu finden sind. Wie eine genauere Analyse dieser Teilsysteme noch zeigen wird, fallen hier sowohl hohe Exergieverlustkosten (vgl. 4.2.2), als auch hohe Investitionskosten an. Wie in Abbildung 4.15 außerdem erkennbar ist, existieren neben den Zusatzkostenbeiträgen der Teilsysteme Zusatzkostenbeiträge durch Gemeinkosten, die nicht verursachungsgerecht auf die Teilsysteme zugeordnet werden können. Hierzu gehören Investitionskosten für die Errichtung der Gesamtanlage, aber auch Personalkosten, die aus dem Management der Gesamtanlage resultieren und mit 0,1126 einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage haben.

4.2.3.3 Transitbereinigung

Wie schon im Fall der exergetischen Analyse soll nachfolgend der Einfluss der Transitbereinigungsvariante auf die Kennzahlen betrachtet werden. Es wurden wiederum die Varianten „keine Transitbereinigung“, „anteilsorientierte Transitbereinigung“ und „wandlungsorientierte Transitbereinigung“ untersucht.

Der mit Abbildung 4.16 mögliche Vergleich der Zusatzkostengrade der Teilsysteme „Aufbereitung“, „Trocknung“ und „Gasreinigung“ zeigt, dass mit Hilfe der exergetischen Transitbereinigung der Anteil der Zusatzkosten nicht mehr durch Exergiekosten, die nicht vom Bilanzraum beein-

flussbar sind, überdeckt wird. Der Zusatzkostengrad der Trocknung ohne Transitbereinigung beträgt 0,0410, so dass von einer hohen exergoökonomischen Effizienz der Prozesse ausgegangen werden muss. Durch den Bezug auf die Kosten, die durch das Teilsystem im Rahmen der anteilsorientierten Transitbereinigung beeinflussbar sind, werden die Kosten, die durch den chemischen Exergieanteil der Spuckstoffe getragen werden als Transitzkosten aufgefasst, so dass der Zusatzkostengrad auf 0,8057 ansteigt. Bei Anwendung der wandlungsorientierten Transitbereinigung ist der Zusatzkostengrad fast eins, was durch den hohen exergetischen Verlustgrad der Trocknung bei großen Systemkosten hervorgerufen wird. Durch die transitbereinigte Analyse werden die Zusatzkosten des Teilsystems aufgrund der darin stattfindenden Prozesse auf die vom Teilsystem beeinflussbaren Kosten bezogen. Nicht berücksichtigt wird bei dieser Vorgehensweise, dass die Transitzexergie ebenfalls durch das Element fließt und die Systemkosten beeinflusst. Beispielsweise ist die chemische Zusammensetzung eines Stoffes entscheidend für die Materialauswahl und damit für die Systemkosten, auch wenn im betrachteten Element diese Zusammensetzung nicht verändert wird. Die Bestimmung eines Kostentransits ist für die Teilsysteme „Thermolyse“ und „Nutzung“ nicht möglich, da hier die gesamte eintretende Exergie zur Umwandlung zur Verfügung steht, so dass der Zusatzkostengrad unabhängig von der Art der Transitbereinigung 0,53 bzw. 0,76 beträgt.

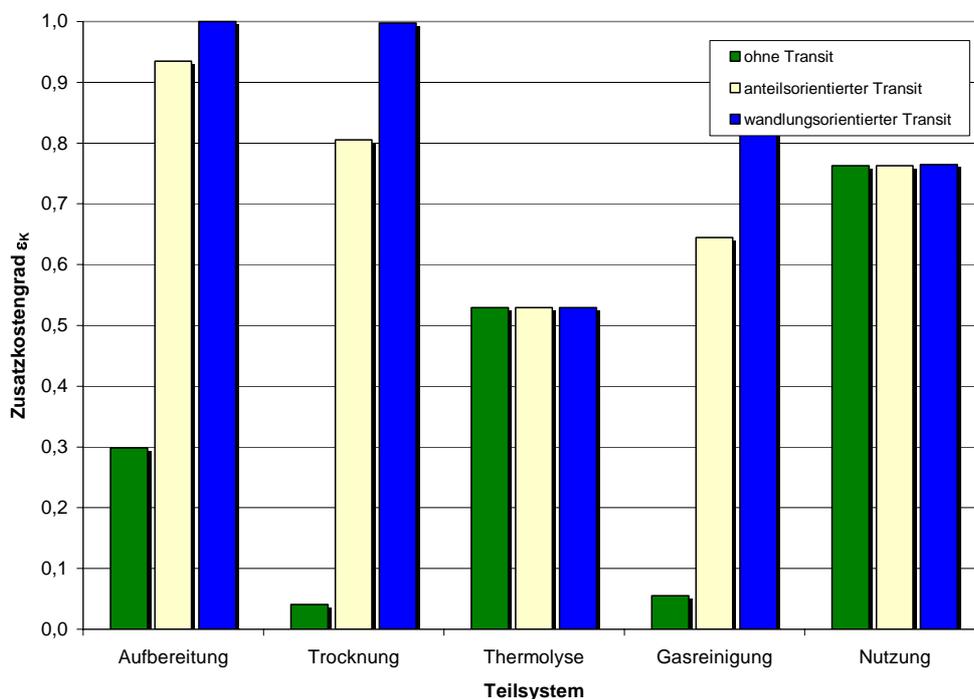


Abbildung 4.16: Zusatzkostengrad in Abhängigkeit von der Transitbereinigung

Durch den Bezug auf die vom Bilanzraum beeinflussbaren Kosten ist eine bilanzraumbezogene Beschreibung der Wirtschaftlichkeit mit Hilfe der wandlungsorientierten Transitbereinigung mög-

lich, ohne dass nicht zu beeinflussende Exergiekosten die Situation verzerren. Daher wurde in der weiteren Bewertung der entsprechende transitbereinigte Zusatzkostengrad verwendet.

Durch die Wahl der Art der Transitbereinigung wird auch der exergoökonomische Wichtungsfaktor beeinflusst. Wie aus Abbildung 4.17 sehr deutlich zu erkennen ist, ergibt sich im unbereinigten Fall eine überragende Bedeutung für die Teilsysteme 2 und 4, was durch Wichtungsfaktoren von 2,6391 bzw. 2,6238 ausgedrückt wird. Die Ursache ist auch hier der große, von chemischen Anteilen dominierte Kostenstrom des Wärmeträgeröls in einem systeminternen Kreislauf, wovon jedoch nur der physikalische Anteil in den Prozessen genutzt wird. Daher bilden die Kennzahlen, die unter Einbeziehung der anteils- oder der wandlungsorientierten Variante der Transitbereinigung berechnet werden, die Situation im Bilanzraum klarer ab. Im Fall des Teilsystems „Trocknung“ ergeben sich dann exergoökonomische Wichtungsfaktoren von 0,1342 bzw. 0,1084, so dass hier nur gut ein Zehntel der gesamten Verfahrenskosten beeinflussbar sind.

Dadurch, dass der exergoökonomische Wichtungsfaktor unter Berücksichtigung der wandlungsorientierten Transitbereinigung die beeinflussbaren Kosten zu den Feedkosten der nächsthöheren Hierarchieebene ins Verhältnis setzt, vermeidet er eine Verzerrung der Situation durch vom Bilanzraum nicht zu vertretende Kosten. Daher wird der transitbereinigte Wichtungsfaktor gemeinsam mit dem transitbereinigten Zusatzkostengrad angewandt.

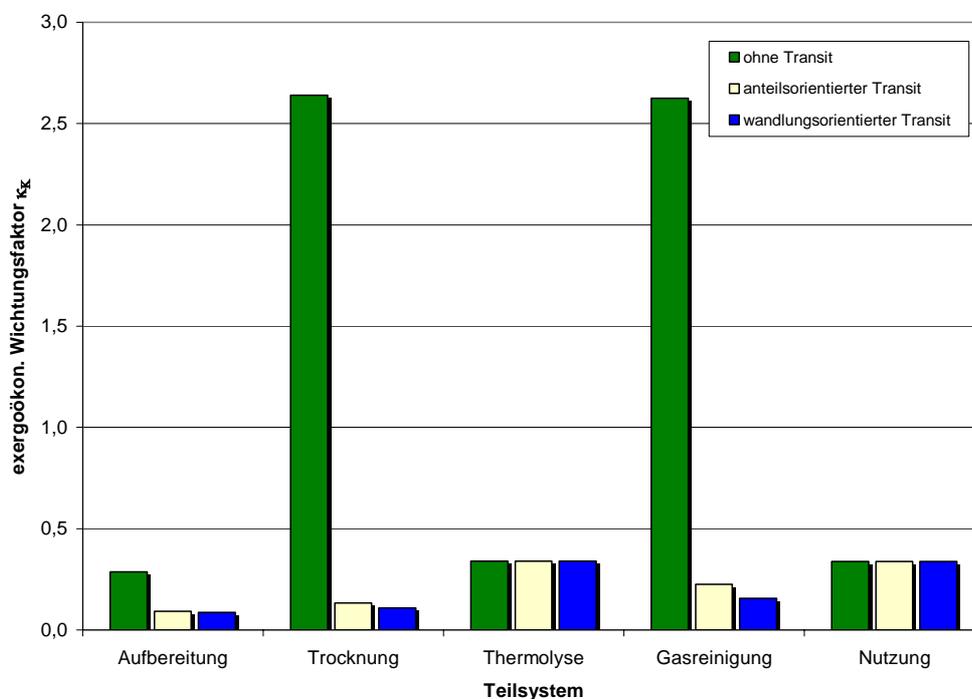


Abbildung 4.17: Exergoökon. Wichtungsfaktor in Abhängigkeit von der Transitbereinigung

Der Vergleich der Transitvarianten anhand des Zusatzkostenbeitrages zeigt keine Differenzen, da auf der Ebene der Vergasungsanlage nur ein minimaler Exergietransit definierbar ist und dieser Strom unter ökonomischen Gesichtspunkten unbedeutend für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist.

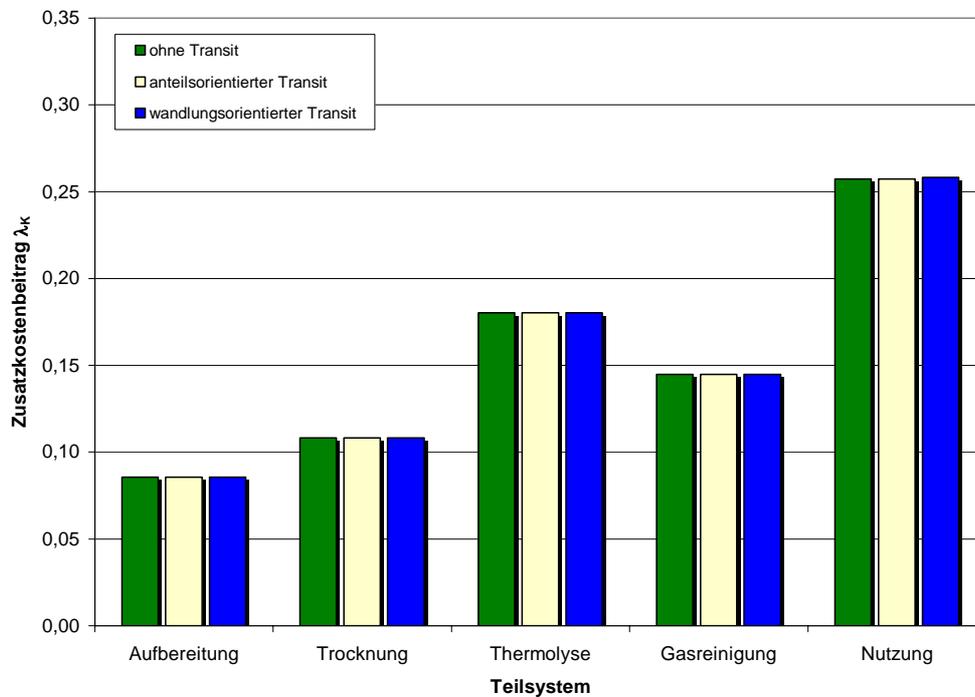


Abbildung 4.18: Zusatzkostenbeitrag in Abhängigkeit von der Transitbereinigung

Folglich sind auch die oben angegebenen exergoökonomischen Kennzahlen des Gesamtsystems, die nicht einer Transitbereinigung unterworfen waren, von der Transitbereinigung unabhängig. Der Vergleich der exergoökonomischen Kennzahlen der letzten drei Abbildungen zeigt, dass für diese Konstellation der Zusatzkostengrad und der exergoökonomische Wichtungsfaktor sich durch die Transitbereinigung gegenläufig entwickeln. Da den wandlungsorientiert bereinigten Kennzahlen aus oben genannten Gründen der Vorzug gegeben wird, kommen in der nachfolgenden Betrachtung auch entsprechend transitbereinigte Zusatzkostenbeiträge zur Anwendung.

4.2.3.4 Zusatzkostenverteilung

Nach den Auswirkungen der Art der Transitbereinigung auf die exergoökonomischen Kennzahlen steht nun die Verteilung der Zusatzkosten auf die Zusatzkostenanteile bei Anwendung der wandlungsorientierten Transitbereinigung im Mittelpunkt der Diskussion.

Von den Gesamtkosten des Verfahrens sind 92,71 % als Zusatzkosten charakterisierbar. Dabei beträgt der Anteil der Exergieverlustkosten 12,87 %, die Investitionskosten stellen einen Anteil von 43,65 % und schließlich bestreiten die Personal- und Wartungskosten als dritter Anteil der Zusatzkosten einen Anteil von 36,23 %. Der geringe Anteil der Exergieverlustkosten an den gesamten Zusatzkosten ist durch den relativ geringen Exergiepreis der eingesetzten Abfallstoffe erklärbar, weshalb die exergetischen Verluste bei der Nutzung von kostengünstig verfügbaren Abfallstoffen eine eher geringe ökonomische Bedeutung haben. Eine größere Aufmerksamkeit bei der Suche nach den Kostenursachen und -einsparpotentialen verlangen daher die Systemkosten. Die Verteilung der Zusatzkostenanteile der Anlage ist im nachfolgenden Dreieckdiagramm zusammengefasst.

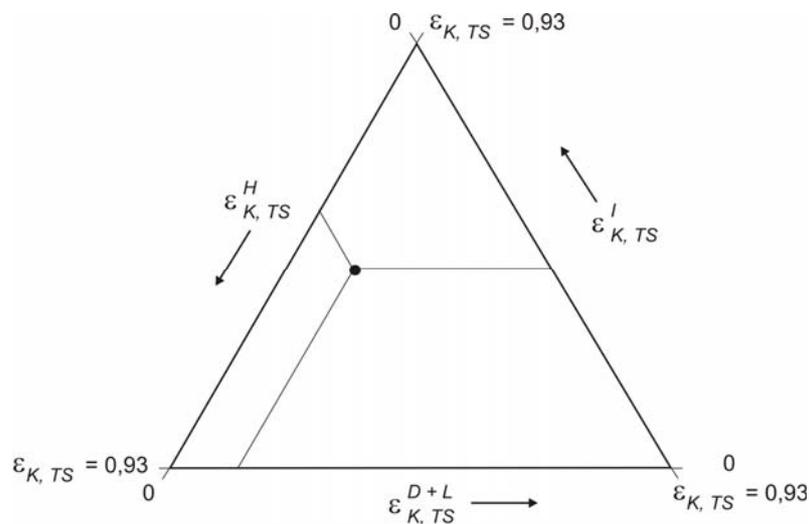


Abbildung 4.19: Dreieckdiagramm der Zusatzkostenanteile

Um die Kostensituation der Teilsystemebene mit zu erfassen, sind in Abbildung 4.20 die Zusatzkostenanteile sowohl des Gesamtsystems als auch der Teilsysteme in einem Dreieckdiagramm mit normierten Achsen eingetragen. Wie der Darstellung zu entnehmen ist, befinden sich alle betrachteten Bilanzräume in den Sektoren D und E, so dass auch hier die Dominanz der Investitionskosten und der Personal- und Wartungskosten deutlich wird.

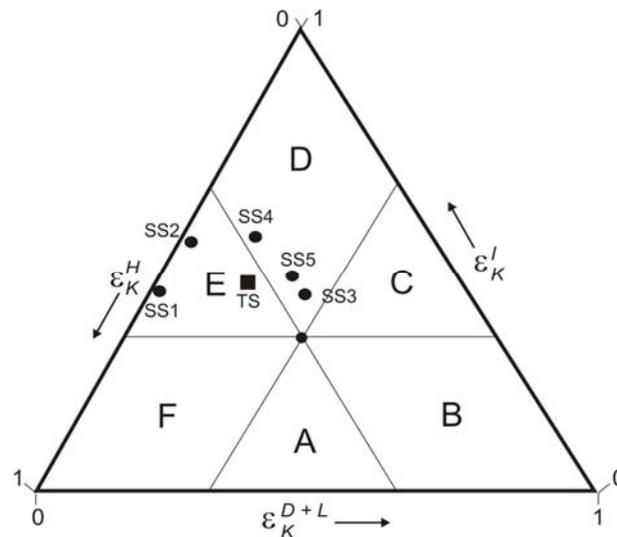


Abbildung 4.20: Verteilung in den Kostensektoren

Eine andere Form der Darstellung ist das Balkendiagramm in Abbildung 4.21, das ebenfalls die Verteilung der Zusatzkosten in den Teilsystemen verdeutlicht. Da hier Zusatzkostenanteile aufgetragen sind, lassen sich sofort die Ansatzpunkte zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des gesamten Verfahrens ableiten. Zu hinterfragen sind aufgrund ihres großen Anteils die Investitionskosten in den Teilsystemen „Thermolyse“, „Gasreinigung“ und „Nutzung“. Einen weiteren Bereich stellen die Personal- und Wartungskosten dar, die jedoch relativ gleichmäßig über die Teilsysteme verteilt sind.

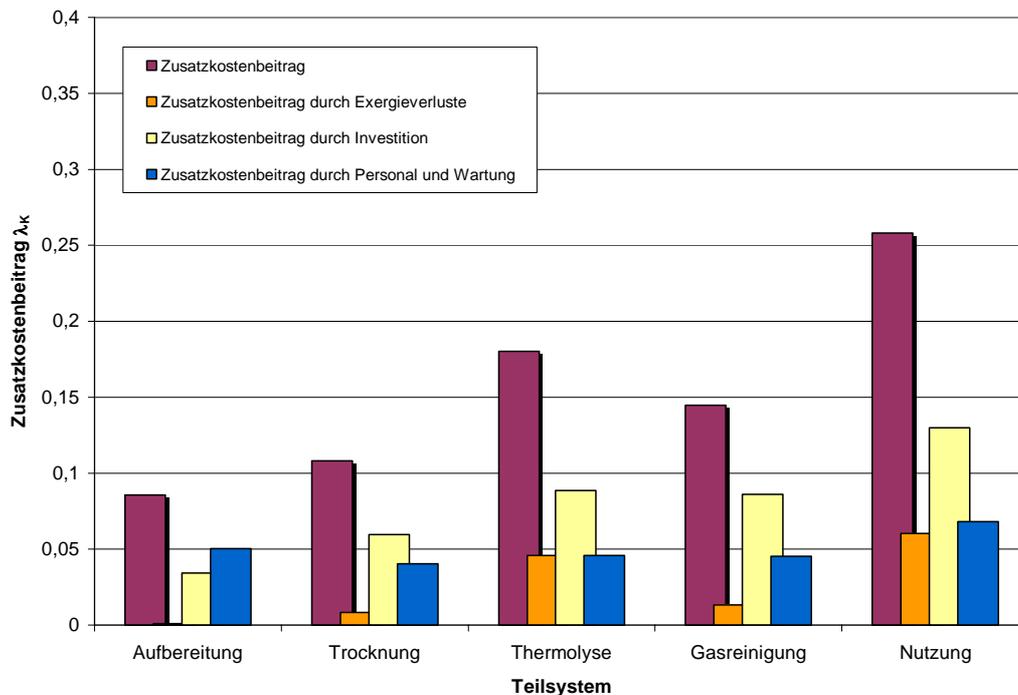


Abbildung 4.21: Anteile an den Zusatzkostenbeiträgen der Teilsysteme

4.2.3.5 Apparateebene

Um noch genauer die Ursachen der Zusatzkosten zu lokalisieren, ist es notwendig, die Ebene der Teilsysteme mit den Apparaten einer Analyse zu unterziehen und damit die Vorteile der hierarchischen Bewertungsmethode zu nutzen.

Das erste Teilsystem ist durch einen Zusatzkostengrad von eins gekennzeichnet, da den ökonomischen Aufwendungen kein exergetisch bewertbarer Nutzen gegenübersteht. Damit sind hier alle Kosten als Zusatzkosten charakterisierbar, wobei 64,12 % durch Gemeinkosten verursacht werden. Folglich stellen die Gemeinkosten, die überwiegend aus Personal- und Wartungskosten bestehen, den Schlüssel für Kostensenkungen dar. Dazu ist der personelle Aufwand, der zur Aufgabe der Einsatzstoffe notwendig ist, zu überprüfen. Neben diesen Gemeinkosten sollten auch die Investitionskosten der beiden Schredder im Fokus der Kosteneinsparung stehen, wobei diese Kosten von der Vorgabe der erforderlichen Zerkleinerung abhängig sind.

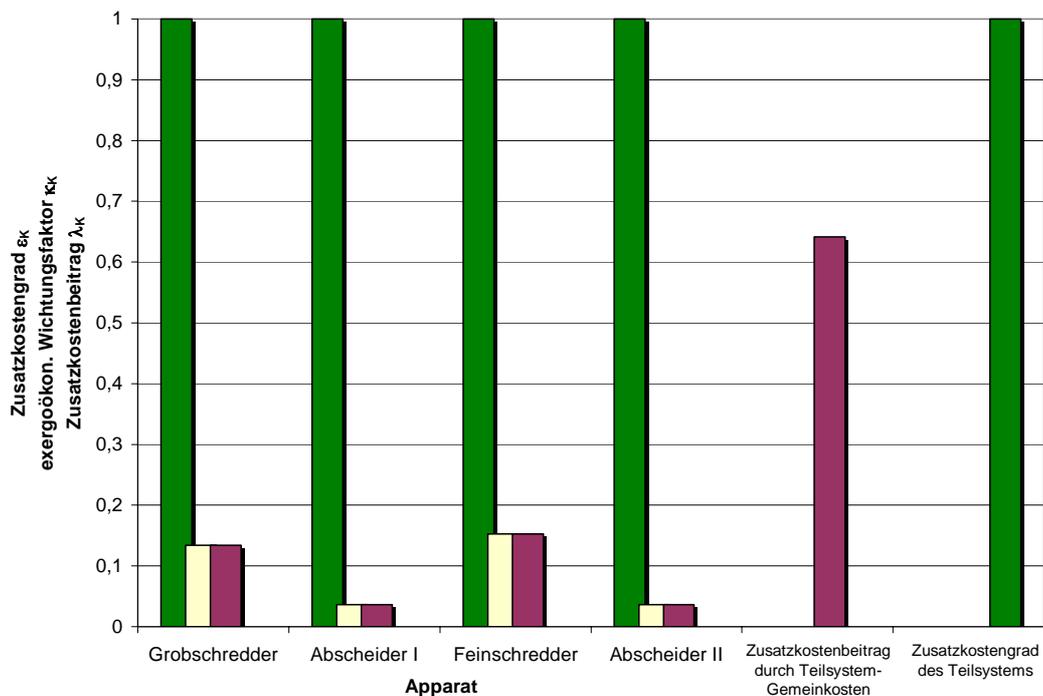


Abbildung 4.22: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Aufbereitung“

Das Teilsystem „Trocknung“ weist einen Zusatzkostengrad von 0,9686 auf, so dass hier eine dem ersten Teilsystem ähnliche Situation vorliegt. Da alle Elemente des Teilsystems ebenfalls durch hohe Zusatzkostengrade gekennzeichnet sind, ist der exergoökonomische Wichtigkeitsfaktor für die Bestimmung der wesentlichen Kostenursachen entscheidend. So ergeben sich drei bedeutende Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit des Teilsystems: die Kosten des Trockners, die Kosten des Wärmeübertragers und die Gemeinkosten, während die Antriebs- und Transporteinrichtungen

auch exergoökonomisch von untergeordneter Bedeutung sind. Damit lassen sich die Zusatzkosten des Teilsystems am effektivsten durch eine Senkung der Exergieverlustkosten in den beiden Apparaten erreichen, da diese Kosten im Vergleich zu den Investitionskosten deutlich dominieren (siehe Anhang 10-7).

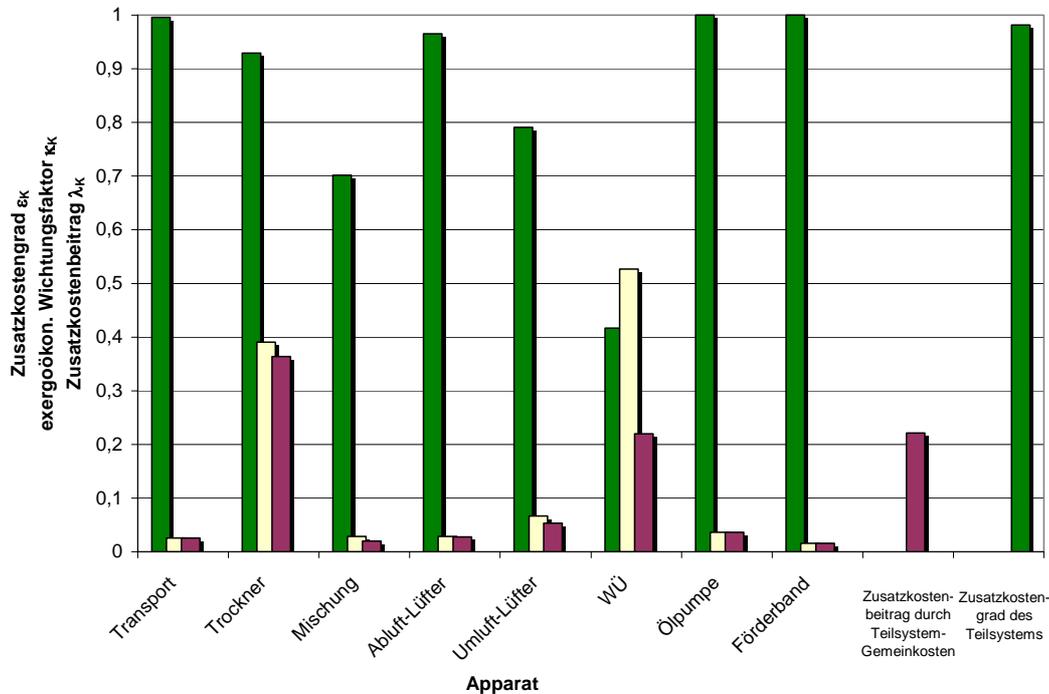


Abbildung 4.23: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Trocknung“

Das dritte Teilsystem weist einen Zusatzkostengrad von 0,2223 auf, was durch die chemische Umwandlung der Einsatzstoffe in Brenngas begründbar ist. Für den Reaktor selbst ist kein Exergietransit bestimmbar, so dass ein großer Teil der Gesamtkosten durch den Exergiepreis der Einsatzstoffe vorgegeben wird. Dies lässt sich auch durch den hohen exergoökonomischen Wichtigkeitsfaktor belegen, was zu einer vernachlässigbaren Bedeutung der restlichen Apparate führt. Durch die Auswahl eines Vergasungsprozesses sind entsprechende Exergieverluste unvermeidlich, so dass im Reaktor der Zusatzkostenbeitrag durch Exergieverluste von 0,1825 den Zusatzkostenbeitrag des Reaktors dominiert. Die Investitionskosten, die mit 0,0659 zum Zusatzkostenbeitrag von 0,2428 beitragen sind hingegen prinzipiell beeinflussbar. Jedoch sind auch hier wesentliche Einflussgrößen auf die Investitionen, beispielsweise durch den Durchsatz und die Vergasungstemperatur, festgelegt.

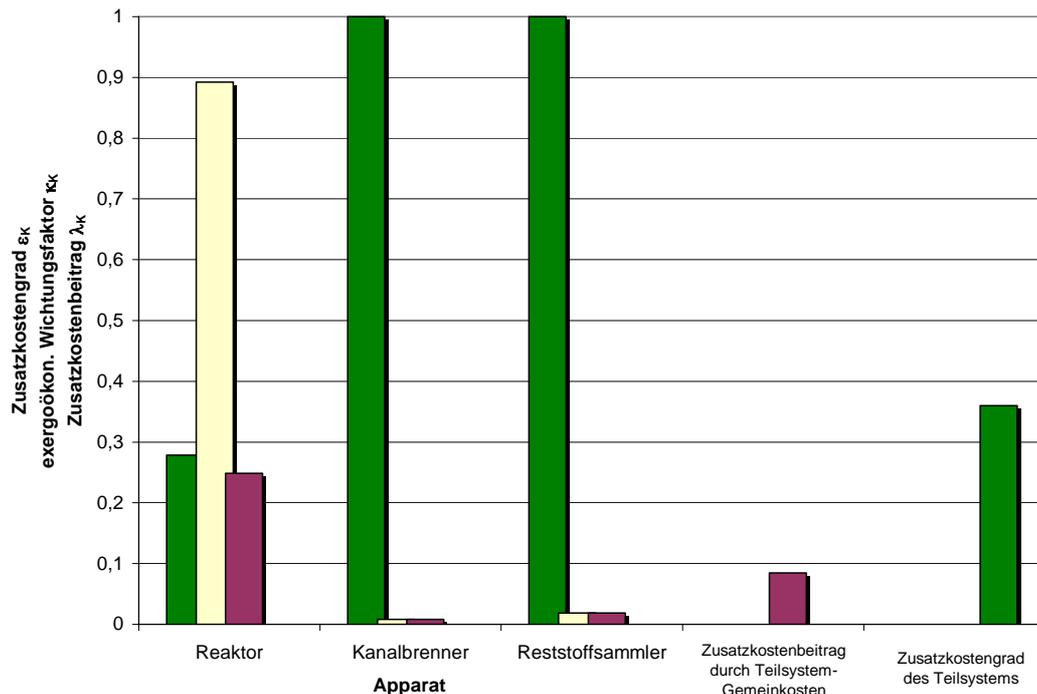


Abbildung 4.24: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Vergasung“

Aus dem Blickwinkel des Teilsystems „Gasreinigung“ stellen die Kosten der Mischstelle und die Gemeinkosten den größten Anteil am Zusatzkostengrad von 0,5461. Die Mischstelle ist durch hohe Exergieverlustkosten gekennzeichnet, da gut die Hälfte der Exergie der kostenträgenden Trocknerabluft entwertet wird. Allerdings ist eine Nutzung des Exergiestromes zur Vorwärmung sinnvoll, da sonst diese Exergie als äußerer Exergieverlust dem Trockner zugerechnet würde und entsprechend die Einsatzstoffe zur Vergasung verteuern würde. Weiterhin fallen Gemeinkosten an, die sich vor allem aus Personal- und Wartungskosten ergeben. Charakteristisch für die restlichen Apparate im Teilsystem ist die geringe exergoökonomische Bedeutung nach der Transitbereinigung, so dass sie einen geringen Zusatzkostenbeitrag trotz der hohen Zusatzkostengrade aufweisen.

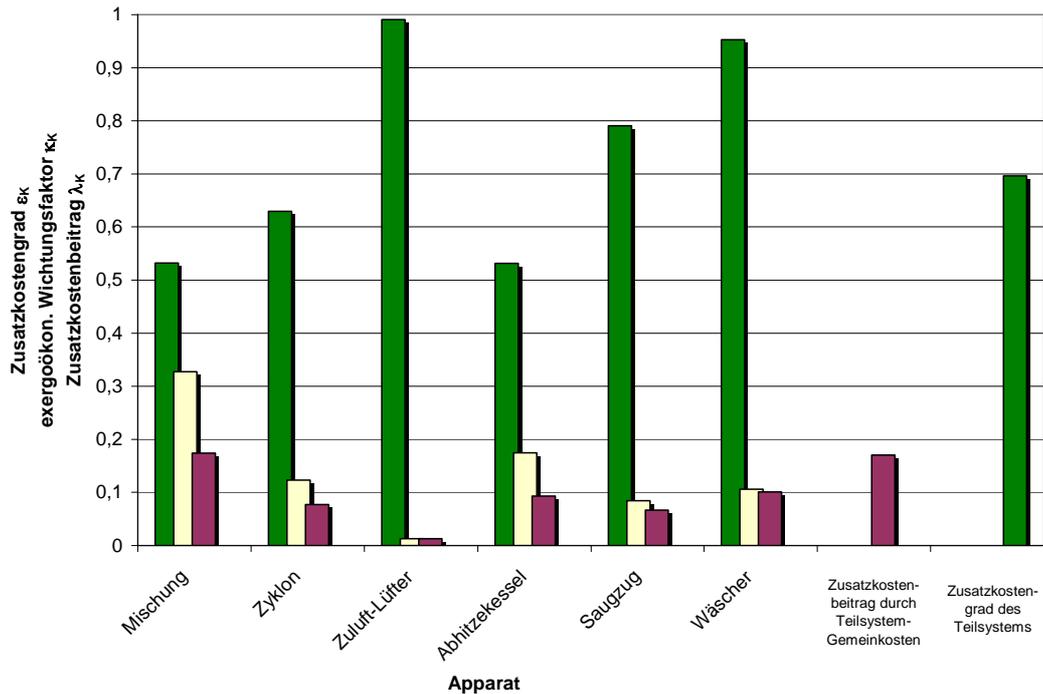


Abbildung 4.25: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Gasreinigung“

Die Situation im Teilsystem „Nutzung“ ist mit dem dritten Teilsystem vergleichbar. Die Analyse auf der Ebene der Apparate im Teilsystem 5 verdeutlicht, dass der Dampferzeuger den größten Anteil der über den naturgesetzlichen Mindestaufwand hinausgehenden Kosten im Teilsystem verursacht. Bedingt durch einen hohen exergetischen Verlustgrad des Apparates und durch die aus Sicht des Teilsystems hohen Exergiekosten des Brenngases, das alle Kosten der durchströmten Elemente zu tragen hat, fallen hier erhebliche Zusatzkosten durch Exergieverluste an. Darüber hinaus führen die großen investiven Aufwendungen für den Dampferzeuger auch zu hohen Investitionskosten. Durch eine Veränderung der thermodynamischen Parameter im Dampferzeuger (z.B. durch eine Erhöhung der mittleren Temperatur der Wärmezufuhr) lassen sich die durch Exergieverluste verursachten Zusatzkosten vermindern. Diesem positiven Effekt steht jedoch ein erhöhter Investitionsaufwand entgegen, weshalb eine Senkung der hohen Zusatzkosten nur durch einen Optimierungsprozess erreicht werden kann. Darüber hinaus zeigt die Darstellung aber auch, dass die Gemeinkosten auf der Apparateebene des Teilsystems 5 einen Anteil an den zusätzlichen Kosten haben. Diese Gemeinkosten umfassen die nicht direkt zuordenbaren Investitions- und Personalkosten für das Teilsystem und liefern durch den Zusatzkostenbeitrag ebenfalls Ansatzpunkte für eine Kostensenkung.

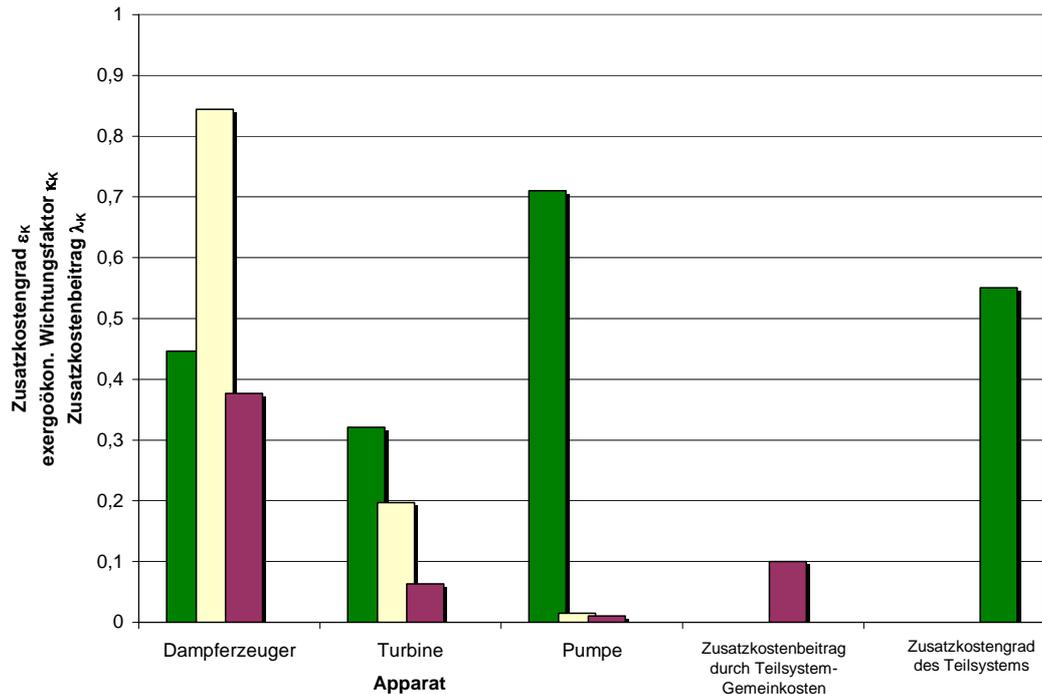


Abbildung 4.26: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Nutzung“

4.2.3.6 Exergieströme

Neben der Analyse und der Bewertung des Systems und der darin enthaltenen Elementen lässt die exergoökonomische Methode auch eine Einschätzung der Effektivität, mit der die Exergieströme im System erzeugt werden, zu.

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Entwicklung des Basiskostenfaktors für die Hauptprodukte der Vergasungsanlage. Die eingesetzten Spuckstoffe (1) weisen einen Basiskostenfaktor von eins auf, da am Eintritt zum System noch keine vom System zu vertretenden Zusatzkosten angefallen sind. Mit jedem Verfahrensschritt werden Zusatzkosten auf die betrachteten Ströme umgelegt, so dass das Verhältnis von Basiskosten zu Gesamtkosten kontinuierlich kleiner wird. Während die Gesamtkosten des aufbereiteten Abfallstoffs nach Durchströmen des ersten Teilsystems (2) noch zu 67,2 % aus Basiskosten bestehen, nimmt der Anteil bei der Weiterbehandlung durch Trocknung (3), durch die Umwandlung in Brenngas (4) und durch die Gasaufbereitung (5) ständig ab, da Zusatzkosten durch Exergieverluste, Investitionen und Personal- und Wartungskosten von dem jeweiligen Produktstrom zu tragen sind. Diese Vorgehensweise verdeutlicht, dass lediglich 7,8 % der Gesamtkosten des Prozessdampfes (6) und 6,1 % der Elektroenergie (7) durch die Exergiepreise und die Mengen der Abfallstoffe und anderer Exergien am Eintritt in die Anlage bestimmt sind und durch die Gesetze der Thermodynamik determiniert werden. Die restlichen Zusatzkosten sind

durch Effizienzsteigerungen oder durch innovative Anlagenkonzepte prinzipiell vermeidbar und stellen das maximal mögliche Kostensenkungspotential bei der Erzeugung der Produktströme dar.

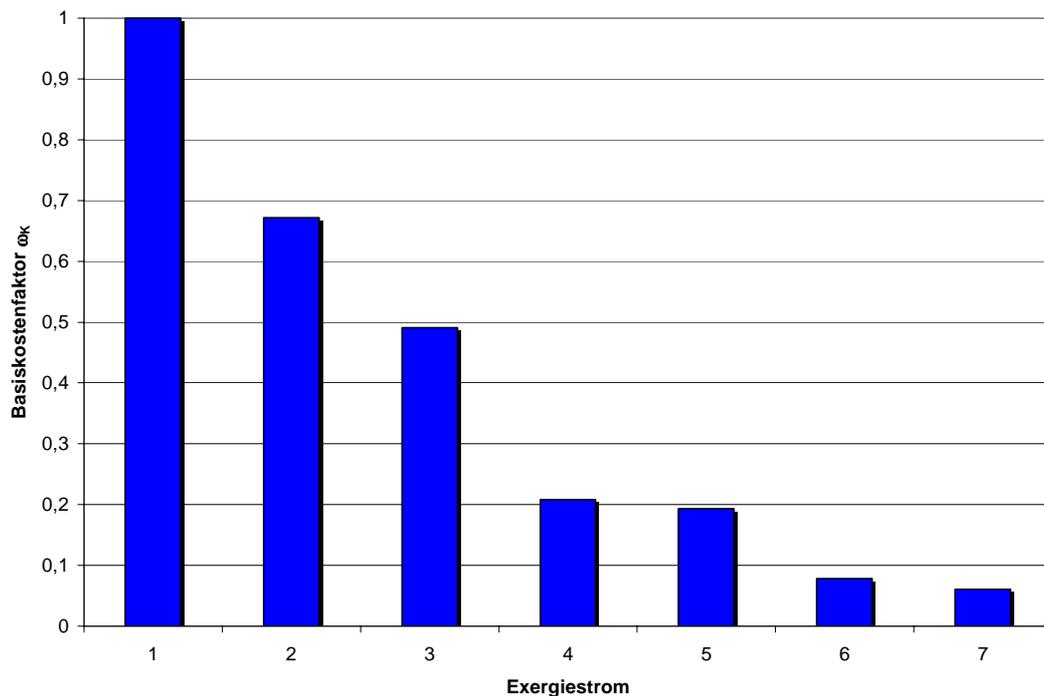


Abbildung 4.27: Basiskostenfaktoren der Ströme

4.2.3.7 Einfluss des Exergiepreises

Zusätzlich zu der exergoökonomischen Bewertung lässt sich das vorhandene Kostenmodell auch zum Studium der Sensitivität der oben genannten Einflussgrößen nutzen. Beispielhaft soll dies anhand des Exergiepreises des Abfallstoffes dokumentiert werden.

Falls der Abfallstoff nicht mit einem Exergiepreis von 1 Cent pro kWh eingekauft werden muss, sondern aufgrund des Verwertungszwanges kostenlos vom Erzeuger erworben werden kann, dann verändert sich auch die exergoökonomische Situation bei der Bewertung der Anlage. Das in Abbildung 4.28 dargestellte Dreieckdiagramm zeigt die neue Verteilung der Zusatzkosten und ermöglicht den Vergleich mit dem Ausgangsszenario, das im Dreieckdiagramm in Abbildung 4.19 dargestellt worden ist. Das Dreieckdiagramm der neuen Situation zeigt, dass der Zusatzkostengrad des Gesamtsystems auf 1,00 angestiegen ist, da nur noch Investitions- sowie Personal- und Wartungskosten, und damit lediglich Zusatzkosten, anfallen. Folglich ist bei der Verwertung von Abfallstoffen, die kostenlos zur Verfügung stehen, allein die Senkung der Systemkosten als Verbesserungsstrategie anzuwenden.

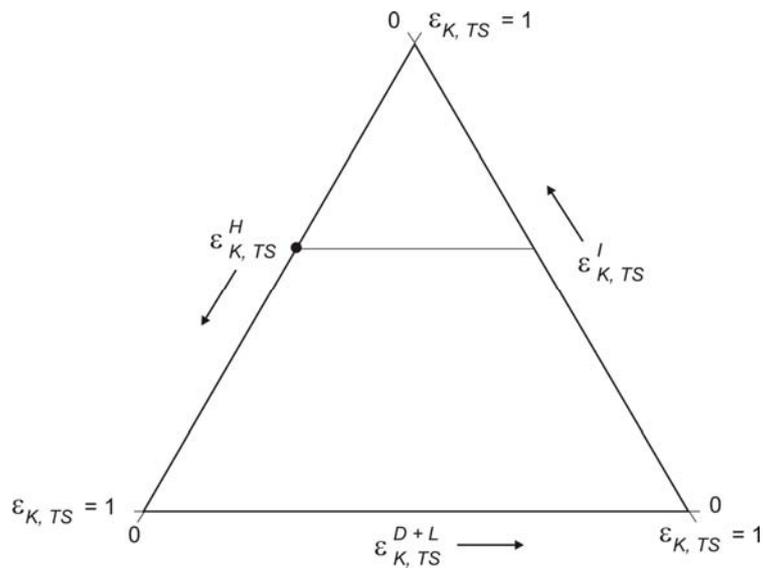


Abbildung 4.28: Zusatzkostenanteile bei einem Abfallstoffpreis von 0,00 EUR/kWh

Dem gegenüber führt ein Exergiepreis von 0,02 EUR je kWh zu einem Zusatzkostengrad von 0,879, so dass schon 12,1 % der gesamten Kosten als Basiskosten anzusehen sind. Die Exergieverlustkosten nehmen einen Anteil von 21,4 % ein, die Investitionskosten verursachen 36,3 % der Kosten und die Personal- und Wartungskosten 30,2 %.

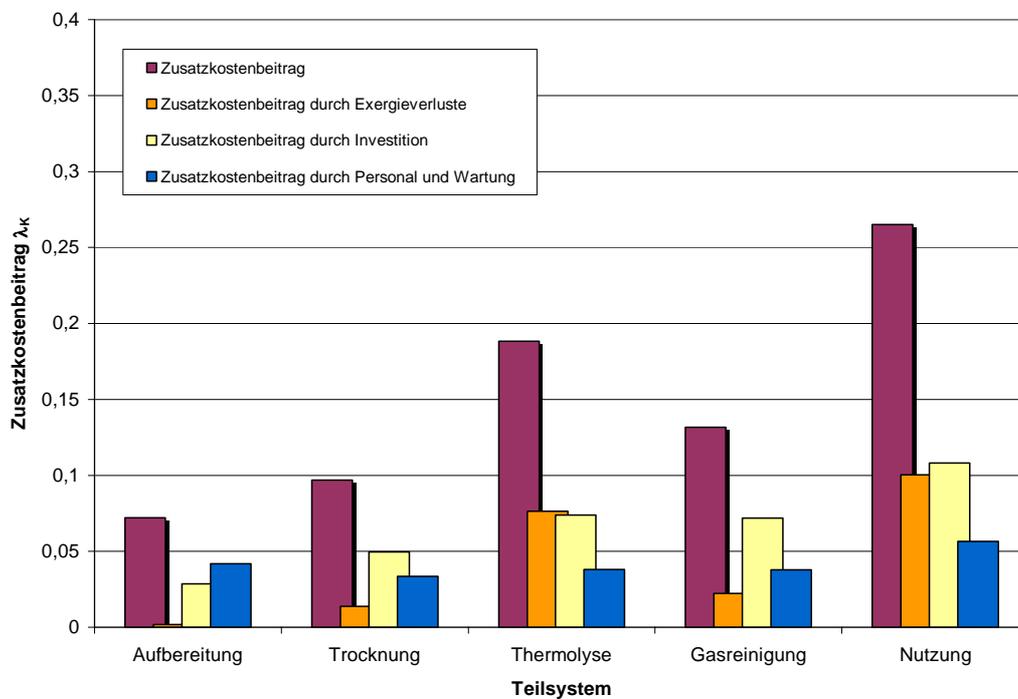


Abbildung 4.29: Zusatzkostenanteile bei einem Abfallstoffpreis von 0,02 EUR/kWh

Die erhöhte Bedeutung der Exergieverlustkosten zeigt auch Abbildung 4.29, da die entsprechenden Zusatzkostenbeiträge ansteigen. Ein Vergleich mit Abbildung 4.21, die die Verteilung bei einem Exergiepreis von 0,01 EUR je kWh zeigt, verdeutlicht dies.

4.2.3.8 Verbesserungsmöglichkeiten

Die energetische Nutzung der Abfallstoffe über die Vergasung ist mit unvermeidlichen Exergieverlusten durch die Thermolyse und durch die Verbrennung des Nutzgases verbunden. Jedoch zeigen die Kennzahlen, dass thermodynamische und ökonomische Verbesserungspotentiale vorhanden sind, die zur Erhöhung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit genutzt werden können. Aus der Untersuchung sind vor allem folgende Problemstellungen als Ansatzpunkte für Verbesserungen hervorzuheben:

- Die Minimierung des verfahrensinternen Bedarfs an Elektroenergie, die mit einem Basisexergiefaktor von nur 0,33 erzeugt wird und somit den dreifachen Primärenergieeinsatz erfordert, verbessert die Effektivität, da gleichzeitig auch die nach außen abgebbare Menge an Elektroenergie steigt.
- In den Fördereinrichtungen im System, in denen die eingesetzte Elektroenergie dissipiert wird, ist der Elektroenergieeinsatz zu minimieren, auch wenn höhere Investitionskosten notwendig sind.
- In diesem Kontext sollte auch eine Absenkung der Anforderungen an die Zerkleinerung der eingesetzten Abfallstoffe in den beiden Schreddern geprüft werden. Damit können sowohl der Elektroenergieeinsatz als auch die Investitionskosten der Schredder gesenkt werden.
- Der Prozessschritt der Trocknung ist mit hohen investiven Aufwendungen und hohen Exergieverlusten verbunden. Es ist zu überlegen, auf den gesamten Verfahrensschritt zu verzichten und so die notwendigen Investitionskosten zu sparen. Dafür muss jedoch eine Effektivitätsminderung in der Thermolyse in Kauf genommen werden, da der Abfallstoff 40 % Wasser enthält, welches dann mit aufheizt und verdampft werden muss.
- Es ist überlegenswert bei Beibehaltung der Trocknungsstufe, die Temperatur der Trocknungsluft zu senken und dafür einen höheren Durchsatz zu realisieren. Dadurch kann die notwendige Wärme aus dem Brenngas bei einem niedrigeren Temperaturniveau ausgekoppelt werden und auch die Exergieverluste der Trocknung würden sich verringern. Für diese

Modifikation sind jedoch an den erhöhten Durchsatz angepasste größere Apparate erforderlich, welche die Investitionskosten steigen lassen.

- Eine weitere Option hinsichtlich der Trocknung der Abfallstoffe besteht in der direkten Vorwärmung der Trocknungsluft anstelle des realisierten Thermalölkreislaufes, was zu einer Einsparung der Investitionskosten für den Wärmeübertrager führt.
- Die Verlustbetrachtung der Gasreinigungsprozesse zeigt große Exergieverluste im Zyklon und in der Gaswäsche. Beide Verluste können reduziert werden, wenn die Niedertemperaturwärme des Brenngases vor der Wäsche zur Vorwärmung der Vergasungsluft genutzt wird. In diesem Fall würde die Eintrittstemperatur des Brenngases in den Wäscher sinken und gleichzeitig die Temperaturdifferenz im Zyklon verkleinert. Dazu ist jedoch ein zusätzlicher Wärmeübertrager mit einer entsprechend großen Wärmeübertragungsfläche erforderlich, der zusätzliche Investitionskosten erfordert.
- Eine weitere Möglichkeit die Exergieverluste der Gasreinigung in den Apparaten Zyklon und Abhitzeessel zu senken besteht in der Erzeugung von zusätzlichem Prozessdampf durch Nutzung der thermischen Exergie des Brenngases auf einem hohen Temperaturniveau, was wiederum einen zusätzlichen Apparat erfordert.
- Die Zumischung von Trocknerabluft zur Vorwärmung der Vergasungsluft mindert den Nutzen der Trocknungsstufe und verursacht hohe Exergieverlustkosten. Ein Wärmeübertrager anstelle der Mischung würde die Exergieverluste und die damit verbundenen Kosten senken. Jedoch sind aufgrund des geringen Temperaturniveaus und einer Gas-Gas-Wärmeübertragung eine große Übertragungsfläche und damit hohe Investitionskosten erforderlich.
- Die Erhöhung der Frischdampfparameter des Dampferzeugers im Teilsystem „Nutzung“ würde zu einer Senkung der Exergieverluste führen. Durch die dazu notwendigen hochwertigen Werkstoffe ergibt sich ein erhöhter Investitionsaufwand.

4.3 Verfahren zur Altreifenpyrolyse

Das zweite Anwendungsbeispiel behandelt ein Anlagenkonzept zur Entsorgung von Altreifen. Im Rahmen einer exergoökonomischen Analyse wurden die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit dieser Variante einer stofflich-energetischen Nutzung der Altreifen untersucht.

4.3.1 Verfahrensbeschreibung

In der betrachteten Anlage zur Pyrolyse von Altreifen ist sowohl eine stoffliche als auch eine energetische Nutzung der Abfallstoffe vorgesehen. Das Verfahren ist für eine Kapazität von 1000 kg Altreifen pro Stunde ausgelegt, die in einem Reaktor pyrolysiert werden.

Der eingesetzte Abfallstoff setzt sich laut Analyse aus den Fraktionen flüchtige Komponenten (55%), Ruß (30 %) und Stahl (15 %) zusammen. Bei der Pyrolyse der Altreifen entstehen als stoffliche Produkte Pyrolyseöl und Pyrolyseruß. Zusätzlich wird der Stahlanteil der Reifen als Nebenprodukt der Anlage abgegeben. Das entstehende Pyrolysegas wird in einem Blockheizkraftwerk genutzt, wobei hier als Produkte Elektroenergie und Prozesswärme entstehen. Die Elektroenergie wird hauptsächlich zur Abdeckung des Eigenbedarfes der Anlage genutzt, während die Niedrigtemperaturwärme in vollem Umfang als Fernwärme nach außen abgegeben wird. Darüber hinaus stellt das Verfahren Hochtemperaturwärme in Form von Prozessdampf bereit, der ebenfalls in ein Dampfnetz eingespeist wird [HEB04].

Tabelle 4.2: Eckdaten der Pyrolyseanlage

Exergiestrom	Massenstrom [kg/h]	Leistung [kW]
Altreifen	1000	9200
Ruß	160	2800
Stahl	294	-
Pyrolyseöl	450	5400
Pyrolysegas (vor BHKW)	93	900
Heißwasser	20000	200
Prozessdampf	190	100
Elektroenergie für Eigenbedarf	-	200

Das projektierte Umwandlungsverfahren setzt sich aus fünf Verfahrensschritten zusammen, die gleichzeitig die Teilsysteme in der hierarchischen Systemstruktur darstellen, wie Abbildung 4.30 zeigt (siehe auch Anhang 11).

Das erste Teilsystem „Materialaufbereitung“ dient zur Reinigung der Altreifen in einer Waschanlage. Die angelieferten Reifen werden in einen mit Wasser gefüllten Kanal gegeben und im Gegen-

wird. In einem zweiten Kondensator wird das Gas weiter bis auf 100 °C abgekühlt, damit das im Gas enthaltene Pyrolyseöl kondensiert und in den Pyrolyseöltank abgeleitet werden kann. Die dabei freiwerdende Wärme wird als Beitrag zur Erzeugung der Fernwärme genutzt. Um die Feuchte aus dem Pyrolysegas zu entfernen, wird es anschließend noch durch einen Kondensator geleitet und bis auf ca. 40 °C abgekühlt. Das restliche Öl und ein großer Anteil des enthaltenden Wassers kondensieren und werden gleichfalls in den Pyrolyseöltank gefördert, wo sich Öl und Wasser trennen können, während das aufbereitete Gas in die nächste Verfahrensstufe eintritt.

Im Teilsystem „Energieerzeugung“ wird das gesamte Pyrolysegas im Blockheizkraftwerk verbrannt. Das dabei entstehende Abgas wird zunächst wie beschrieben im Trockner des zweiten Teilsystems genutzt. Danach strömt es mit einer Temperatur von ca. 480 °C zurück in das vierte Teilsystem und wird in einem Dampferzeuger genutzt, der wiederum Prozessdampf mit den gleichen Dampfparametern (3 bar, 180 °C) bereitstellt. Es schließt sich wiederum ein Wärmeübertrager zur Fernwärmeerzeugung an, bevor eine Kalkwäsche folgt und das Abgas über den Schornstein abgegeben wird. Zusätzlich sind diesem Teilsystem noch der Kühlturm zur Abwärmeabfuhr sowie der Sammelbehälter und Verteiler für die Fernwärmeversorgung zugeordnet. Für die Fernwärme wurde von einer Vorlauftemperatur von 80 °C und einer Rücklauftemperatur von ca. 65 °C ausgegangen.

Die festen Produkte werden im Teilsystem „Feststoffstrecke“ zur Nutzung aufbereitet. Dazu wird der Stahlanteil vom Ruß und den verbliebenen, nicht pyrolysierten Kordresten getrennt. Der Stahl wird in der Stahlgurtpresse konditioniert und aus dem Verfahren ausgeschleust. Der Ruß und die Kordreste werden ebenfalls separiert, wobei im Verfahren 294 kg Ruß pro Stunde aus den Altreifen entstehen, der als granuliertes Produkt die Anlage verlässt [HEB04].

4.3.2 Ergebnisse der exergetischen Analyse

Die exergetische Analyse wurde für den Auslegungszustand der Anlage angefertigt [KRO06]. Durch den Einsatz von 1000 kg Altreifen je Stunde, die die oben beschriebene Zusammensetzung aufweisen, wird dem System eine Leistung von 9,59 MW Exergie zugeführt. Im Verfahren entstehen 450 kg/h Pyrolyseöl, was einem Exergiestrom von 5,41 MW entspricht. Als weitere stoffliche Produkte werden Ruß (2,96 MW) und Stahl genutzt. Darüber hinaus wird Fernwärme mit den oben angegebenen Parametern produziert, was einer Exergie von 0,13 MW entspricht, und in geringem Umfang Prozessdampf bereitgestellt.

4.3.2.1 Gesamtverfahren

Das gesamte Verfahren weist einen Verlustgrad von lediglich 0,0858 auf, der durch den hohen Anteil der stofflich genutzten Produkte Pyrolyseöl und Ruß begründbar ist. Zudem durchlaufen die beiden Hauptprodukte lediglich eine Umwandlungsstufe. Einen genaueren Einblick in die Verlustquellen des Systems liefert bereits die nachstehende Abbildung, die die Verlustbeiträge der Teilsysteme zum Verlustgrad des Verfahrens dokumentiert. Zur Berechnung der Kennzahlen wurde die wandlungsorientierte Transitbereinigung verwendet.

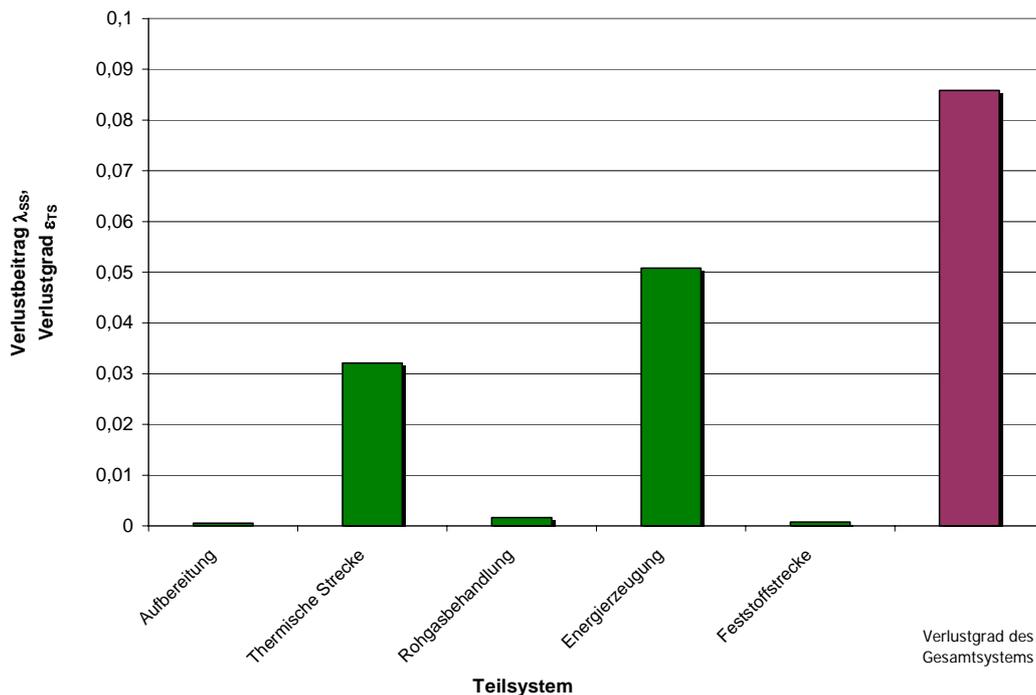


Abbildung 4.31: Verlustbeiträge zum Verlustgrad des Gesamtsystems

4.3.2.2 Teilsystemebene

Die Abbildung 4.31 offenbart die Bedeutung der beiden Subsysteme mit chemischer Umwandlung, die thermische Strecke und die Energieerzeugung, für die Erklärung der Umwandlungsverluste. Eine deutliche Verbesserung der Effizienz des Verfahrens ist nur bei Veränderungen in den genannten Teilsystemen zu erwarten. Hingegen ist der Einfluss der Prozessschritte der Aufbereitung der Altreifen, die Behandlung des Rohgases und der festen Produkte auf die Effizienz des Verfahrens gering. Die Aufteilung des Verlustbeitrages der Teilsysteme in Verlustgrad und Wichtungsfaktor, wie in Abbildung 4.32, unterstreicht diese Aussage.

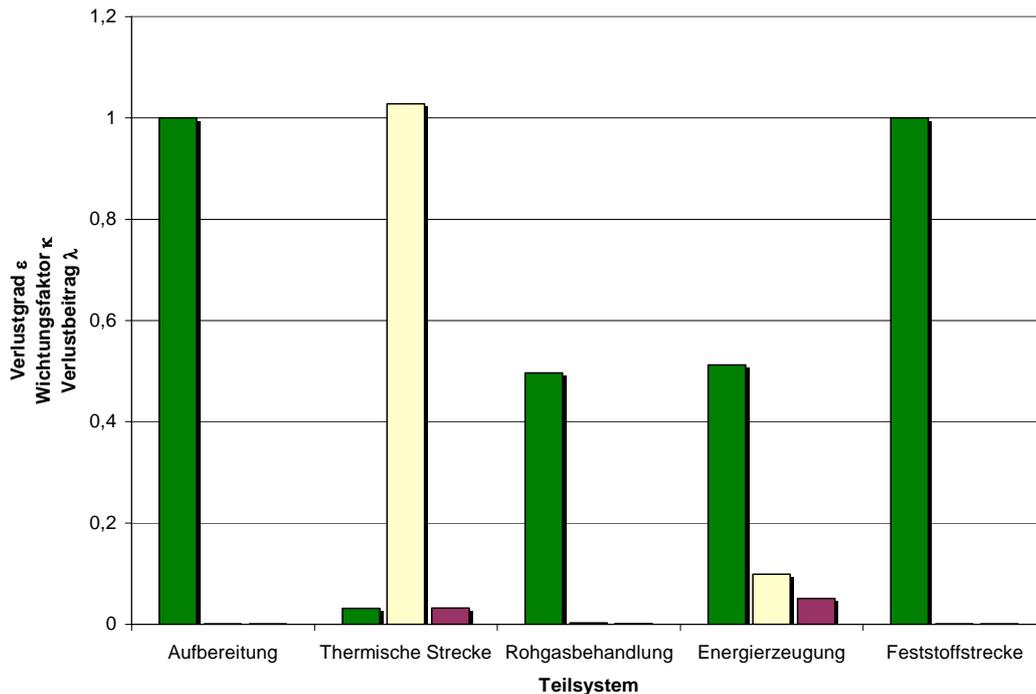


Abbildung 4.32: Exergetische Kennzahlen der Teilsysteme

Betrachtet man zunächst die Verlustgrade der einzelnen Teilsysteme, so zeigt sich, dass die komplette Feedexergie der Teilsysteme „Aufbereitung“ und „Feststoffstrecke“, die jeweils im Wesentlichen als Elektroenergie zum Antrieb der Anlagen charakterisierbar ist, dissipiert wird. Jedoch sind die hier aufgewandten Feedexergien unbedeutend gegenüber der Feedexergie des Gesamtverfahrens, was durch einen Wichtungsfaktor von fast null dokumentiert wird.

Die Darstellung zeigt, dass bei Anwendung der wandlungsorientierten Transitbereinigung der Wichtungsfaktor entscheidend die Verlustbeiträge beeinflusst. Im Teilsystem 2, der thermischen Strecke, wird die komplette Exergie der Altreifen gewandelt, die gleichzeitig die dominierende Feedexergie des gesamten Verfahrens ist. Aufgrund dieser Tatsache und aufgrund von Rückführungen im System (Nutzung der Abgase des BHKW zur Trocknung) zeigt sich hier ein Wichtungsfaktor von 1,03 und verdeutlicht den immensen Einfluss auf die Effizienz des Verfahrens.

Im Subsystem „Energieerzeugung“ findet zwar auch eine chemische Umwandlung statt, jedoch nicht mit der gesamten Exergie des Altreifens, sondern lediglich mit der Exergie der entstandenen Pyrolysegase. Dies erklärt den kleineren Wichtungsfaktor von 0,099. Der kleine Wichtungsfaktor des dritten Teilsystems zeigt, dass die dort umgewandelte physikalische Exergie der Pyrolysegase klein gegenüber der chemischen Umwandlung durch die Pyrolyse ist, jedoch kann eine detaillierte Analyse auf Apparateebene auch hier Verlustquellen offen legen.

4.3.2.3 Apparateebene

Da im ersten Teilsystem die Reifen nur vorgereinigt und transportiert werden und keinerlei Stoff- und Energiewandlungsprozesse der Reifen auftreten, ist alle eintretende Exergie mit Ausnahme der Antriebsenergie für die Fördertechnik als Transitexergie zu werten. Dies hat zur Folge, dass einzig der Exergieverlust der Fördertechnik auftritt, da der Filter wie auch die Reifenwaschanlage als verlustfrei angenommen werden, da Druckverluste im Filter sowie eventuell benötigter Pumpenantrieb in der Reifenwaschanlage aufgrund des geringen Einflusses und aufgrund nicht vorhandener Daten vernachlässigt wurden.

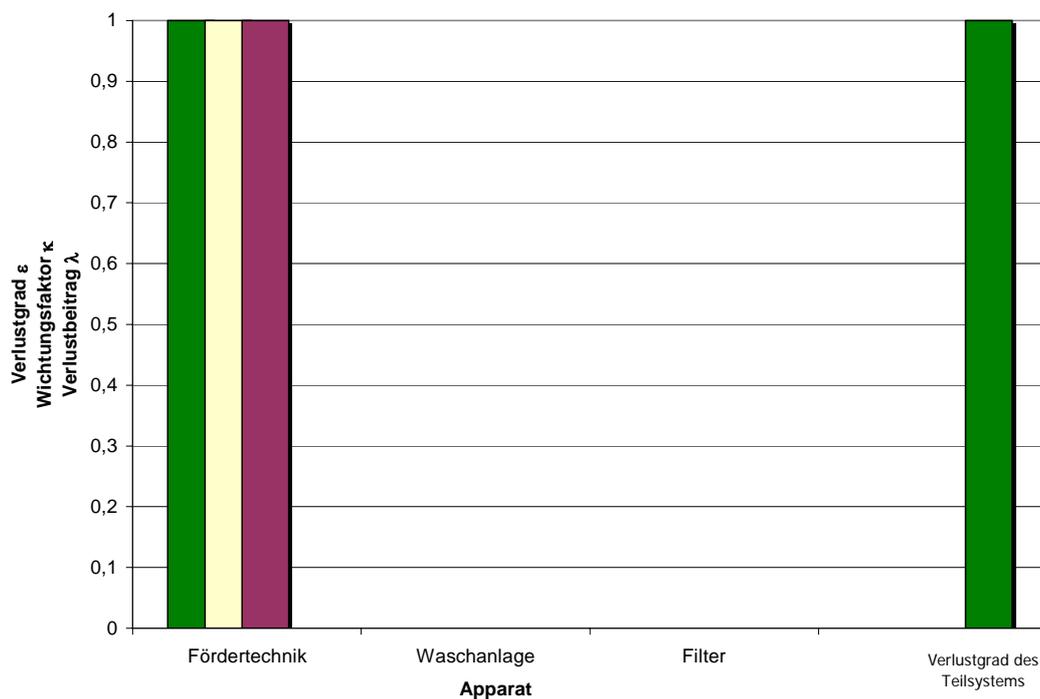


Abbildung 4.33: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Aufbereitung“

Da die gesamte Antriebsleistung dissipiert wird, ergibt sich ein Verlustgrad für die Fördertechnik von eins. Aufgrund der Spezifik des Teilsystems folgen ein Wichtungsfaktor von eins und somit auch ein Verlustbeitrag von eins. Es zeigt sich an dieser Stelle deutlich, dass die Datenlage für die Aussagekraft der exergetischen Analyseessenzial ist. Eine Verbesserung der exergetischen Effektivität des Teilsystems lässt sich demnach nur durch die Reduktion der aufgewandten Elektroenergie erreichen, die jedoch auch von dem Durchsatz an Altreifen abhängig ist.

Der wichtigste Apparat des zweiten Teilsystems ist der Pyrolysereaktor, da dort eine chemische Umwandlung stattfindet. Daher ist auch die Feedexergie, die diesem Subsystem zugeführt wird, sehr groß, so dass die Fördertechnik, die etwa die gleiche Antriebsenergie wie das Element im ersten Teilsystem benötigt, einen Verlustbeitrag von lediglich 0,0003 zum Verlustgrad des Teilsystems

tems liefert. Die Abrollstrecke, der Filter und die Schleuse arbeiten erneut unter Vernachlässigung von Druckverlusten und Antriebsenergien verlustfrei und haben deshalb den Verlustgrad 0. In den beiden Wärmeübertragern im Teilsystem (Abkühlstrecke und Trockner) entsteht der Verlust durch die Temperaturdifferenz der beteiligten Medien und die Konvektionsverluste an die Umgebung. Da durch den Trockner zwei heiße Ströme geleitet werden (direkte und indirekte Vorheizung), die Wärme an die kalten Altreifen sowie die Umgebung abgeben, dissipiert ein großer Teil der Exergie, was in einem Verlustgrad von 0,8284 sichtbar wird. Auch in der Abkühlzone erwärmen sich die heißen Feststoffe aus dem Pyrolysereaktor Wasser von 65 auf 80 °C, also bei einer mittleren Temperaturdifferenz von ca. 180 K. Da die exergetischen Verluste auf die große Feedexergie des Subsystems bezogen werden, sind die Verlustbeiträge mit 0,0063 für den Trockner und mit 0,0010 für die Abkühlzone sehr klein.

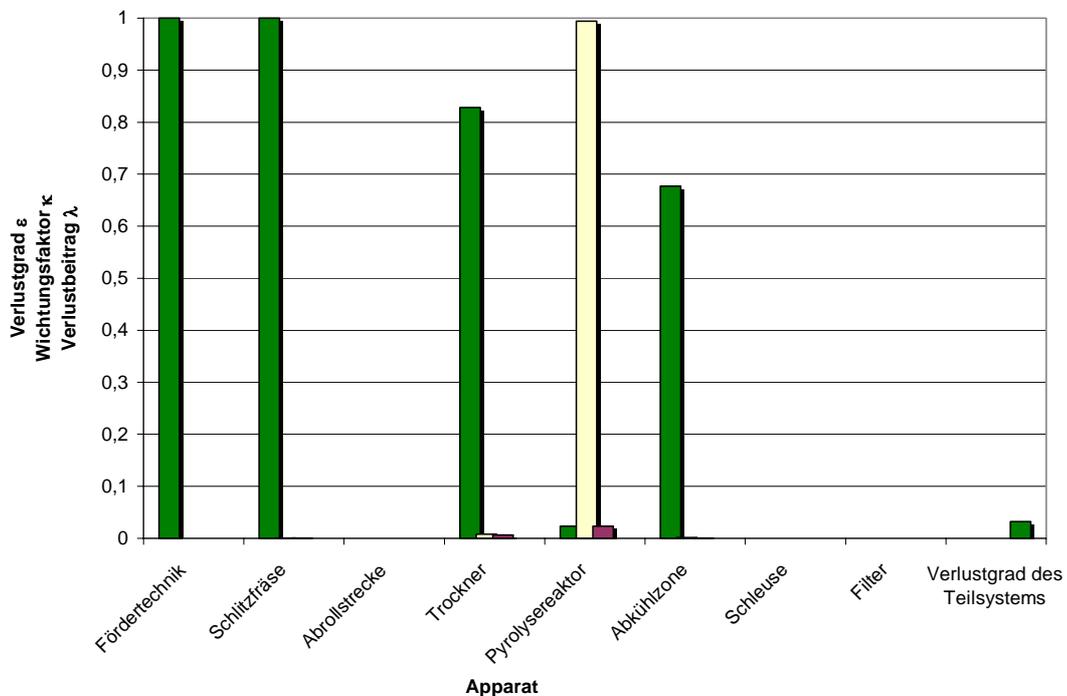


Abbildung 4.34: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Thermische Strecke“

Den größten Verlustbeitrag im Teilsystem verursacht der Pyrolysereaktor. Der Verlustgrad des Reaktors von 0,0228 setzt sich aus dem inneren Verlustgrad durch die stoffliche Umwandlung von 0,0170 und dem äußeren Verlustgrad von 0,0058 zusammen. Da die Pyrolyse endotherm verläuft, muss dem Reaktor elektrische Energie zugeführt werden, die dissipiert wird und einen Teil der inneren Verluste erklärt. Die äußeren Verluste werden durch die indirekten äußeren Verluste, die durch die ungenügende Nutzung der im Reaktor entstandenen thermischen Exergie im Verfahren resultieren, dominiert. So werden beispielsweise die thermischen Exergieverluste, die erst am Kühl-

turm und am Pyrolyseöltank offensichtlich werden, dem Reaktor als Verursacher zugeordnet. Zusätzlich ergeben sich noch äußere Verluste durch Konvektion und Wärmestrahlung, da im Reaktor eine Temperatur von ca. 480 °C herrscht. Diese Verluste können durch eine bessere Isolierung verringert werden, wohingegen die Exergieverluste der chemischen Reaktion durch die Wahl des Verfahrens festgelegt sind.

Das dritte Subsystem zur Rohgasbehandlung besteht aus drei Wärmeübertragern und dem Pyrolyseöltank. In den Wärmeübertragern entstehen die Exergieverluste neben der Strahlung und Konvektion der Wärme in die Umgebung als äußerer Verlust durch die unterschiedlichen Temperaturniveaus der beteiligten Medien.

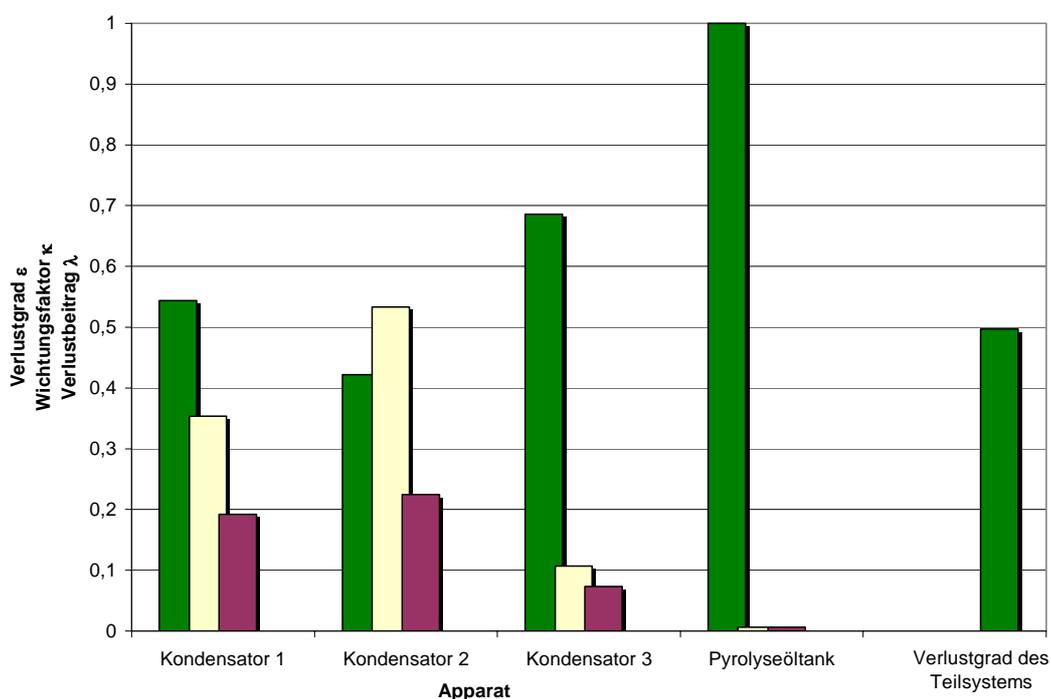


Abbildung 4.35: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Rohgasbehandlung“

Der Kondensator 1, mit dem Prozessdampf durch die Abkühlung der gasförmigen Pyrolyseprodukte erzeugt wird, weist einen Verlustgrad von 0,5437 auf. Das Wasser mit einer Temperatur von 65 °C wird bei einem Druckniveau von 3 bar verdampft und der Dampf auf ein Temperaturniveau von 180 °C erhitzt. Dazu werden die Pyrolyseprodukte von ca. 300 °C auf etwa 200 °C abgekühlt, so dass der Prozess aufgrund der großen Temperaturdifferenz mit großen Exergieverlusten verbunden ist. Eine Vorwärmung des Wassers würde diese Verluste vermindern. Die Konvektionsverluste spielen für den Verlustgrad eine eher untergeordnete Rolle.

Im zweiten Wärmeübertrager kondensieren Gasbestandteile durch eine Abkühlung auf 100 °C. Der Verlustgrad des Wärmeübertragers von 0,4218 lässt sich wiederum mit der Temperaturdiffe-

renz der Medien erklären, die jedoch geringer als im Kondensator 1 sind. Die große Feedexergie dieses Apparates aufgrund der Kondensation führt zu einem Wichtungsfaktor von 0,5331 und folglich zu einem Verlustbeitrag von 0,2248, was auf die Hauptverlustquelle des dritten Teilsystems hindeutet. Da im letzten Wärmeübertrager keine hohen Temperaturen mehr auftreten, ist die thermische Exergie aller Stoffströme entsprechend geringer und folglich auch die Feedexergie. Der exergetische Verlustgrad von 0,6855 wird jedoch durch den Wichtungsfaktor von 0,1072 relativiert. Damit beträgt der Verlustbeitrag dieses Wärmeübertragers 0,0735.

Der Pyrolyseöltank mit Phasentrenner ist der vierte Apparat in diesem Teilsystem und dient der Zwischenspeicherung des Öls. Aufgrund von Mischungsvorgängen ergibt sich für diesen Apparat ein exergetischer Verlustgrad von eins. Da das Öl-Wasser-Gemisch im Tank längere Zeit gespeichert wird, kühlt es sich bis auf Umgebungstemperatur ab. Dieser Betrag der Exergieverluste wird jedoch nicht dem Pyrolysetank zugerechnet, weil die Verluste an thermischer Exergie, die im Pyrolysereaktor ihren Ursprung haben, durch eine unzureichende Nutzung im System begründet sind. Daher wird dieser Verlust dem Pyrolysereaktor als indirekter äußerer Verlust angelastet.

Der Verlustgrad des vierten Teilsystems von 0,5122 wird hauptsächlich vom Verlustbeitrag des Blockheizkraftwerks mit 0,4692 beeinflusst. Bei der erforderlichen Verbrennungsrechnung wurde von 90 kg Pyrolysegas pro Stunde ausgegangen, das mit einfachem Luftüberschuss, d. h. $\lambda=2$, verbrannt wird. Der exergetische Wirkungsgrad der Elektroenergieerzeugung beträgt dabei 0,34. Da in diesem Apparat eine chemische Wandlung stattfindet, ist das Verhältnis von Feedexergie zur Feedexergie des Teilsystems 0,8916. Durch die Wahl der Verbrennung als Prozess sind die wesentlichen Exergieverluste durch die irreversible Verbrennungsreaktion unumgänglich.

Die Abgase des BHKW verlassen das Subsystem und treten nach ihrer Nutzung im Trockner des zweiten Teilsystems wieder in das vierte Teilsystem ein. Die noch vorhandene thermische Exergie der Abgase wird durch einen Dampferzeuger und danach durch einen Wärmeübertrager genutzt und schließlich mit 100 °C an die Umgebung abgegeben, um Kondensationsprozesse im Schornstein zu vermeiden. Die Verlustanteile der beiden Wärmeübertrager sind auch wiederum von der Temperaturdifferenz zwischen den beteiligten Medien und den Konvektionsverlusten abhängig. Im Dampferzeuger beträgt die mittlere Temperaturdifferenz etwa 86 K, so dass hier eine Vorwärmung des Speisewassers aus exergetischer Sicht vorteilhaft erscheint.

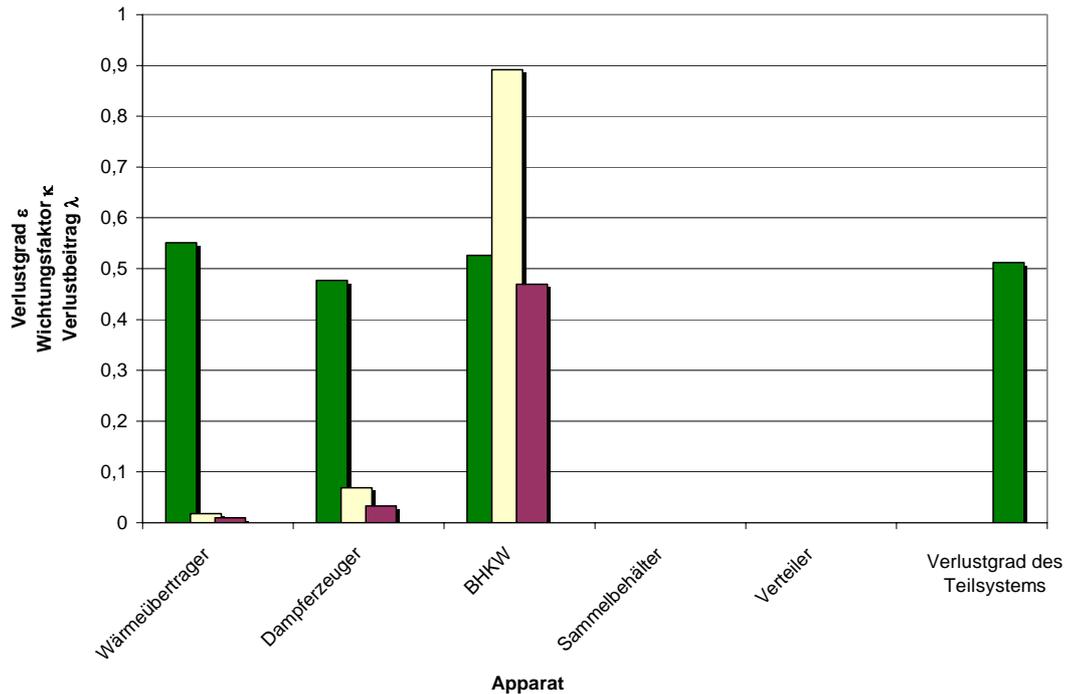


Abbildung 4.36: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Energieerzeugung“

Da in der vorgestellten Berechnungsvariante davon ausgegangen wird, dass das Pyrolysegas keinen Schwefel enthält, ist eine Rauchgaswäsche für die verwendete Brennstoffzusammensetzung nicht erforderlich. Der Exergieverlust, der durch die Abgabe der heißen Rauchgase nach dem Schornstein an die Umgebung auftritt, ist als indirekter äußerer Verlust zu charakterisieren. Die Entstehung des Exergieverlusts ist im Verbrennungsprozess des BHKW begründet, so dass dieser Verlust dem BHKW verursachungsgerecht zugeordnet wird, da im Schornstein keine Nutzung dieser Exergie möglich ist.

Der Verteiler und der Sammelbehälter, die für die Erzeugung der Fernwärme erforderlich sind, wurden aufgrund der mangelnden Datenbasis als ideal angenommen und arbeiten somit verlustfrei. Im Kühlturm wird der Wasserstrom, der aus dem dritten Wärmeübertrager des Teilsystems „Rohgasbehandlung“ resultiert, auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Diese Verluste werden als indirekte äußere Exergieverluste dem Pyrolysereaktor als Verursacher angelastet, da die im Pyrolyseprozess entstehende thermische Exergie einer Nutzung zuzuführen ist. Der Kühlturm dient lediglich der Abfuhr der ungenutzten Wärme und weist daher auch einen Verlustgrad von 0 auf.

Das fünfte Teilsystem „Feststoffstrecke“ ist mit dem ersten Teilsystem vergleichbar, da auch hier lediglich eine Aufbereitung der erzeugten festen Pyrolyseprodukte erfolgt. Daher setzt sich die transitbereinigte Feedexergie, auf der der Verlustgrad bezogen wird, nur aus der aufgewendeten Elektroenergie für die Stahlgurtpresse und die Rußgranulierung zusammen.

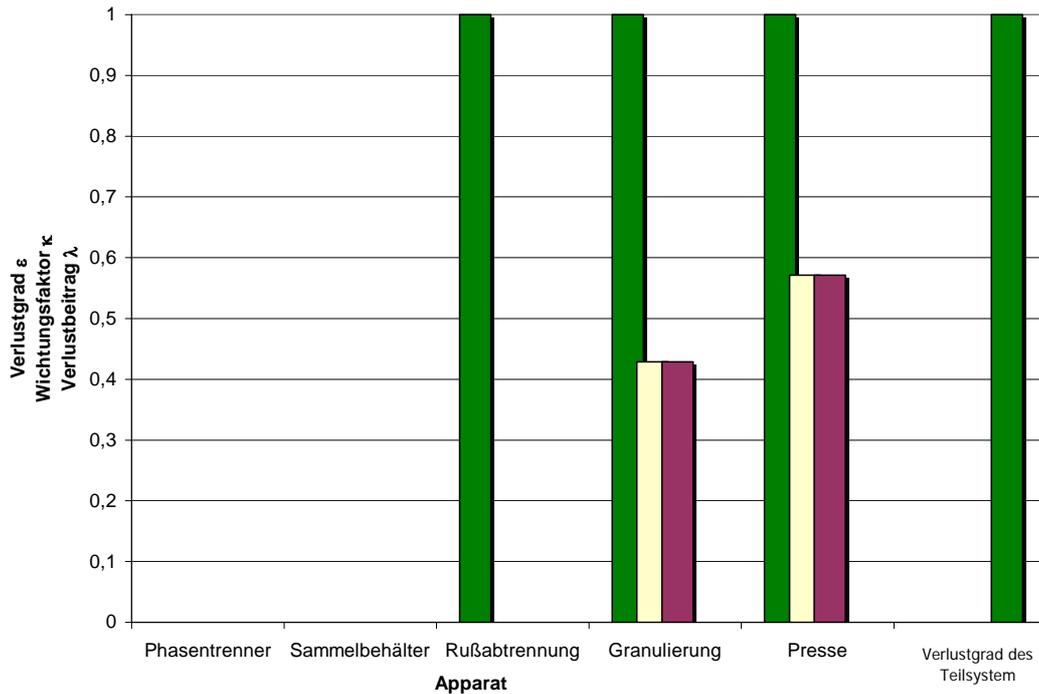


Abbildung 4.37: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Feststoffstrecke“

Da diese Energie nicht auf die Ströme übertragen wird, sondern vollständig in diesen Apparaten dissipiert wird, ist wiederum der Wichtungsfaktor entscheidend. Daher teilt sich der Verlustanteil der Apparate im Verhältnis der benötigten Antriebsenergie auf. Beim Phasentrenner wurde die Ansaugleistung der Luft, beim Feingutzwischenbehälter und der Rußabtrennung die Förderleistungen der Ströme vernachlässigt, da die entsprechenden Daten nicht verfügbar waren und von einem unwesentlichen Einfluss auf den Gesamtprozess ausgegangen werden kann.

4.3.3 Ergebnisse der exergoökonomischen Analyse

Aufbauend auf der exergetischen Bewertung wird nun die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens exergoökonomisch bewertet [KUN06]. Zusätzlich zu den Ergebnissen der exergetischen Analyse wurden folgende ökonomische Randbedingungen berücksichtigt:

- eine jährliche Benutzungszahl von 7500 h/a,
- eine Eigenkapitalquote von 100 % und
- eine Nutzungsdauer von 10 Jahren.

Zum Betrieb der Pyrolyseanlage werden 6 Beschäftigte eingesetzt, die die Steuerung der Anlage sowie die Aufgabe der Abfallstoffe und den Abtransport der Produkte und Reststoffe sicherstellen.

Zusätzlich wird ein Beschäftigter für die Verwaltung bzw. das Management der Anlage benötigt, der im Einschichtsystem arbeitet. Die Wartungskosten der Anlage werden mit einem 2%igen Aufschlagsatz auf die Investitionskosten bestimmt, die Versicherungskosten werden mit einem 0,5%igen Aufschlag auf die Investitionskosten modelliert. Die Altreifen weisen einen Exergiepreis von 1 Cent pro kWh Exergie auf, was gleichzeitig auch der Exergiepreis des Rücklaufes der Fernwärme ist.

4.3.3.1 Gesamtsystemsebene

Für diese ökonomischen Randbedingungen lassen sich für das gesamte Verfahren die nachstehenden jährlichen Kosten berechnen:

- Exergiekosten von 727 321 EUR pro Jahr,
- Investitionskosten von 250 000 EUR pro Jahr und
- Personal- und Wartungskosten von 573 500 EUR pro Jahr,

die zu jährlichen Gesamtkosten für die Altreifenverwertung von 1 550 773 EUR führen, die von den erzeugten Produktströmen zu tragen sind. Aus den angegebenen Gesamtkosten lässt sich noch keine umfassende Bewertung des Verfahrens ableiten. Als erster Schritt wird mit Hilfe der wandlungsorientierten exergetischen Transitbereinigung der Kostentransit des Gesamtsystems bestimmt. Es ergeben sich Feedkosten der Exergie von 721 820 EUR/a, da beispielsweise die Exergie des Fernwärmerücklaufs nicht vom System umgewandelt wird und damit als Kostentransit in Erscheinung tritt.

Die Berechnung der Basiskosten des Verfahrens zeigt, dass 42,7 % der Gesamtkosten unter den gegebenen Rahmenbedingungen als thermodynamische Minimalkosten charakterisierbar und naturgesetzlich unvermeidbar sind. Bedingt durch die Exergieverlustkosten, die Investitionskosten und die Personal- und Wartungskosten weist das Verfahren einen Zusatzkostengrad von 0,5730 auf. Für die Ableitung von möglichen Kostensenkungsmaßnahmen ist die Verteilung der Zusatzkosten notwendig. Das nachfolgende Verlustgrad-PAUER-Zahl-Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen thermodynamischer Effektivität und den Systemkosten für das Verfahren (TS) auf.

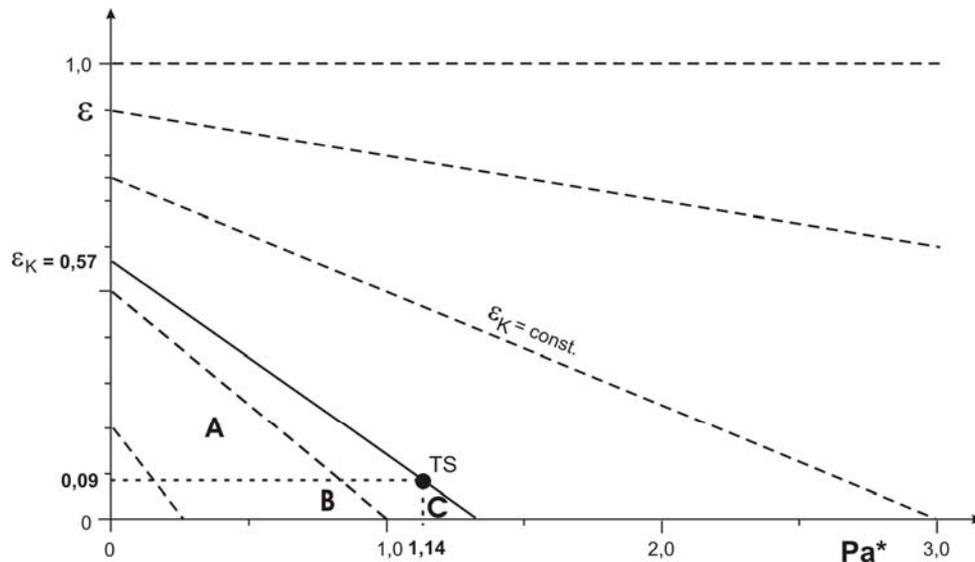


Abbildung 4.38: e-Pa*-Diagramm des Gesamtsystems

Aus der Darstellung lässt sich entnehmen, dass die Systemkosten den entscheidenden Anteil an den Zusatzkosten stellen. Der Spielraum zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei steigender exergetischer Effektivität, hier charakterisiert durch die Sektoren B und C, ist aufgrund der günstigen Kombination von stofflich-energetischer Nutzung der Altreifen geringer als für eine Entwicklung in Richtung Sektor A. Dies würde eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch Senkung der Systemkosten unter Inkaufnahme von steigenden Exergieverlustkosten bedeuten.

4.3.3.2 Teilsystemebene

Um die Analyse zu präzisieren, sollen die Vorteile der hierarchischen Strukturierung genutzt und zunächst die Verteilung der Zusatzkosten auf die Teilsysteme näher untersucht werden. Die Abbildung 4.39 veranschaulicht die Zusatzkostenbeiträge der Teilsysteme und der Gemeinkosten zum Zusatzkostengrad des Verfahrens.

Es zeigt sich, dass der größte Beitrag durch die Gemeinkosten für Personal- und Wartung mit 0,2046 gestellt wird. Diese Zusatzkosten können nicht auf die Teilsysteme umgelegt werden, da hier Personalkosten für den Anlagenfahrer und das Management für das Verfahren insgesamt anfallen. Alle anderen Zusatzkostenbeiträge tragen jeweils weniger als 10 % zu den gesamten Zusatzkosten bei.

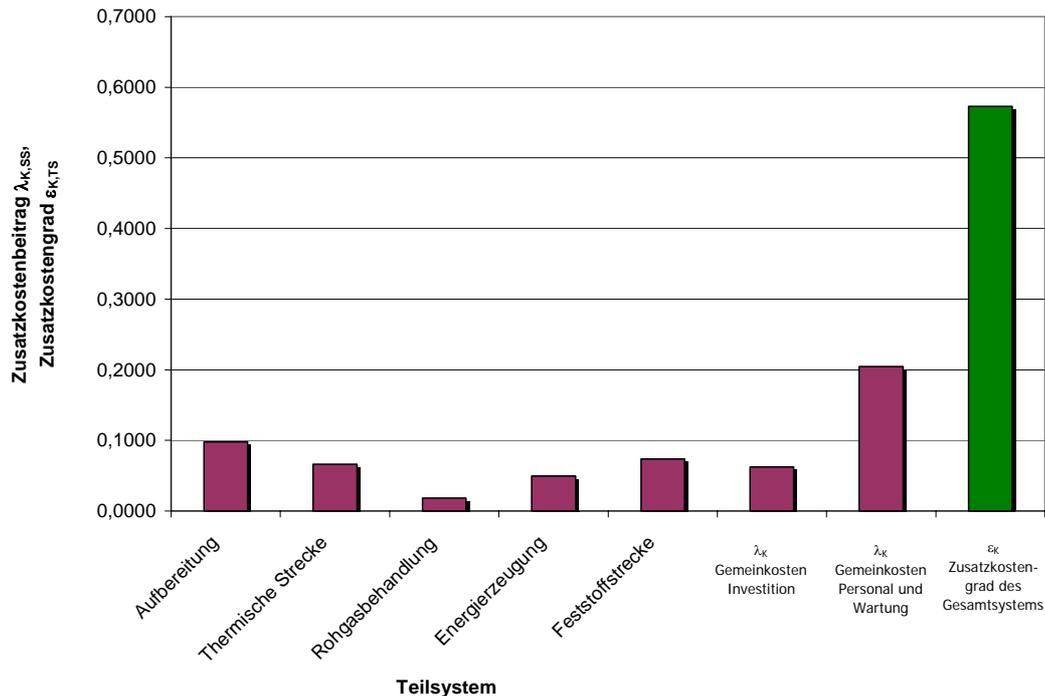


Abbildung 4.39: Zusatzkostenbeiträge zum Zusatzkostengrad des Gesamtsystems

Wie Abbildung 4.40 illustriert, weisen die Teilsysteme „Aufbereitung“ und „Feststoffstrecke“ jeweils Zusatzkostengrade von fast eins auf. Folglich ist als Ziel die Minimierung dieser Zusatzkosten anzustreben. Der sehr hohe Zusatzkostengrad wird von der exergoökonomischen Bedeutung für das Gesamtsystem relativiert, was die oben angegebenen Zusatzkostenbeiträge von 0,0978 bzw. 0,0737 belegen. Die Situation im Teilsystem „Rohgasbehandlung“ ist ähnlich, hier ist der exergoökonomische Wichtungsfaktor mit 0,0191 sehr gering, weshalb die Zusatzkosten für das Gesamtsystem ebenfalls von geringer Bedeutung sind. Einflussreicher dagegen ist die Wirtschaftlichkeit des zweiten Teilsystems, was auch der entsprechende Wichtungsfaktor von 0,5302 unterstreicht und zu einem Verlustbeitrag von 0,0664 führt. Die Energieerzeugung in Teilsystem 4 kombiniert einen relativ geringen Zusatzkostengrad mit einem niedrigen Wichtungsfaktor, so dass der Verlustbeitrag von 0,0496 den relativ geringen Einfluss auf die exergoökonomische Effektivität des Verfahrens belegt.

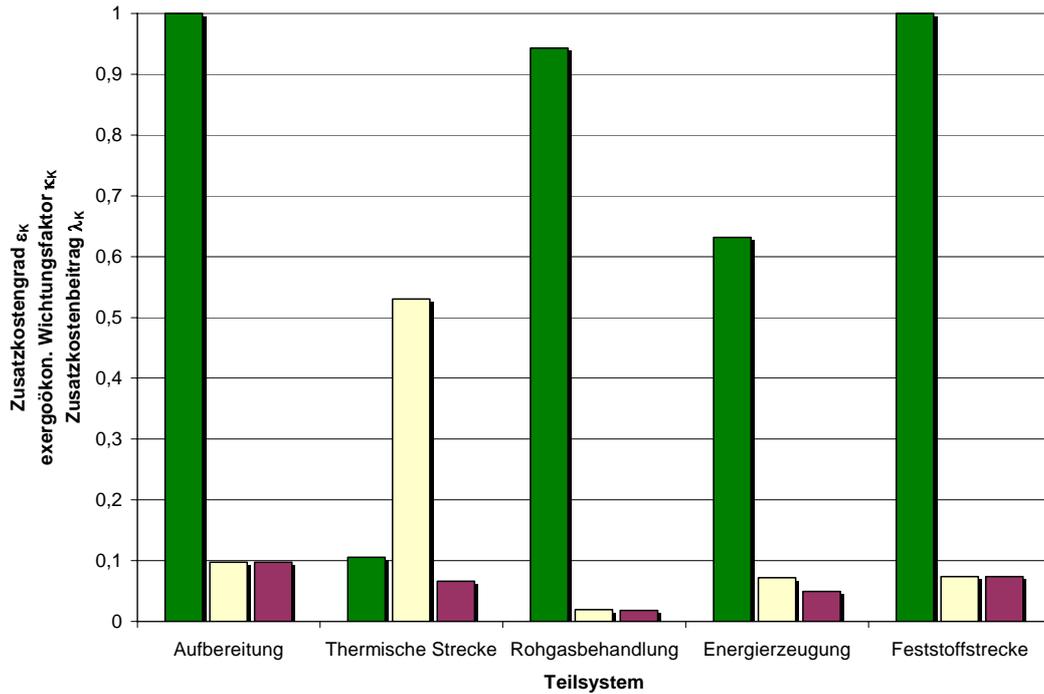


Abbildung 4.40: Exergöökonomische Kennzahlen der Teilsysteme

4.3.3.3 Zusatzkostenverteilung

Zur Analyse der Verteilung der Zusatzkosten auf die Anteile Exergieverlustkosten, Investitionskosten und Personal- und Wartungskosten soll die nachfolgende Darstellung der Anteile am Zusatzkostengrad genutzt werden.

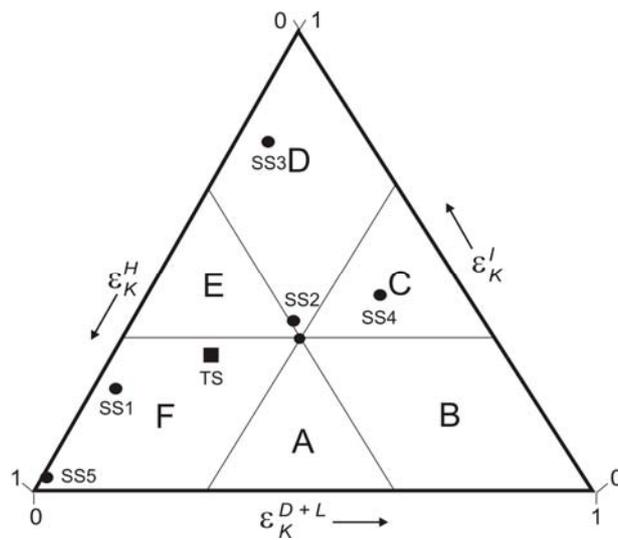


Abbildung 4.41: Verteilung in den Kostensektoren

Es ist erkennbar, dass das Gesamtsystem sowie das erste und fünfte Teilsystem im Sektor F einzuordnen sind. In diesen Bilanzräumen stellen die Personal- und Wartungskosten den größten Anteil der Zusatzkosten, so dass eine entscheidende Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch eine Senkung dieser Kosten erzielbar ist. Die Lage des Teilsystems „Thermische Strecke“ in der Darstellung verdeutlicht, dass alle Zusatzkostenanteile für die Zusatzkosten verantwortlich sind. Die Investitionskosten dominieren die Zusatzkosten im dritten Teilsystem, da hier geringe Exergieverluste auftreten und der personelle Aufwand zum Betrieb der Rohgasbehandlung gering ist. Folglich lässt sich die Wirtschaftlichkeit bei Betrachtung der Investitionskosten am ehesten verbessern. Das vierte Teilsystem zeigt durch seine Lage in Sektor C den bestimmenden Einfluss der Exergieverlustkosten und der Investitionskosten, die zu großen Teilen auf den Einsatz des BHKW zurückzuführen sind.

Eine weitere Form der graphischen Analyse der Zusatzkosten demonstriert die nachfolgende Abbildung, die die Anteile der einzelnen Zusatzkosten am Zusatzkostenbeitrag eines Teilsystems verdeutlicht. Das Diagramm hat den Vorteil, neben der diskutierten Verteilung auch den Einfluss der einzelnen Zusatzkostenanteile auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems abzubilden. Man erkennt, dass die Personal- und Wartungskosten der Teilsysteme „Aufbereitung“ und „Feststoffstrecke“ sowie die Investitionskosten der Thermischen Strecke von entscheidender Bedeutung sind.

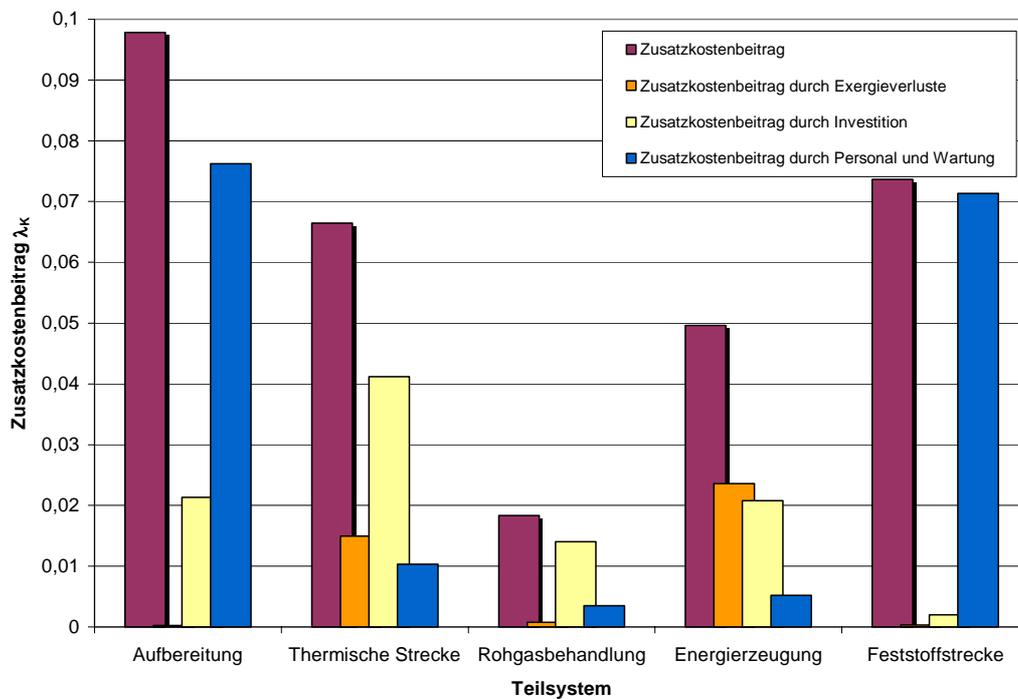


Abbildung 4.42: Anteile an den Zusatzkostenbeiträgen der Teilsysteme

4.3.3.4 Apparateebene

Um die Ursachen der Zusatzkosten in den Teilsystemen zu lokalisieren, wird die Hierarchiestufe „Apparate im Teilsystem“ nun genauer exergoökonomisch bewertet. Die Apparate zur Aufbereitung der Altreifen sowie das erste Teilsystem selbst weisen einen Verlustgrad von eins auf, da nur Zusatzkosten auftreten und wie oben beschrieben kein exergetisches Produkt definiert werden kann. Die Hauptursachen für die Zusatzkosten liegen teilweise in der Fördertechnik begründet, die Exergieverlustkosten und Investitionskosten verursacht, und damit einen exergoökonomischen Wichtungsfaktor von 0,1991 erhält. Die Exergieverlustkosten resultieren aus der Dissipation der im System mit beträchtlichem ökonomischem Aufwand erzeugten Elektroenergie, die einen Basiskostenfaktor von 0,24 aufweist. Jedoch bieten die Gemeinkosten des Teilsystems, die hauptsächlich aus nicht Apparaten zuordenbaren Personalkosten bestehen, mit einem Zusatzkostenbeitrag von 0,7188 das größte Potential für Kosteneinsparungen.

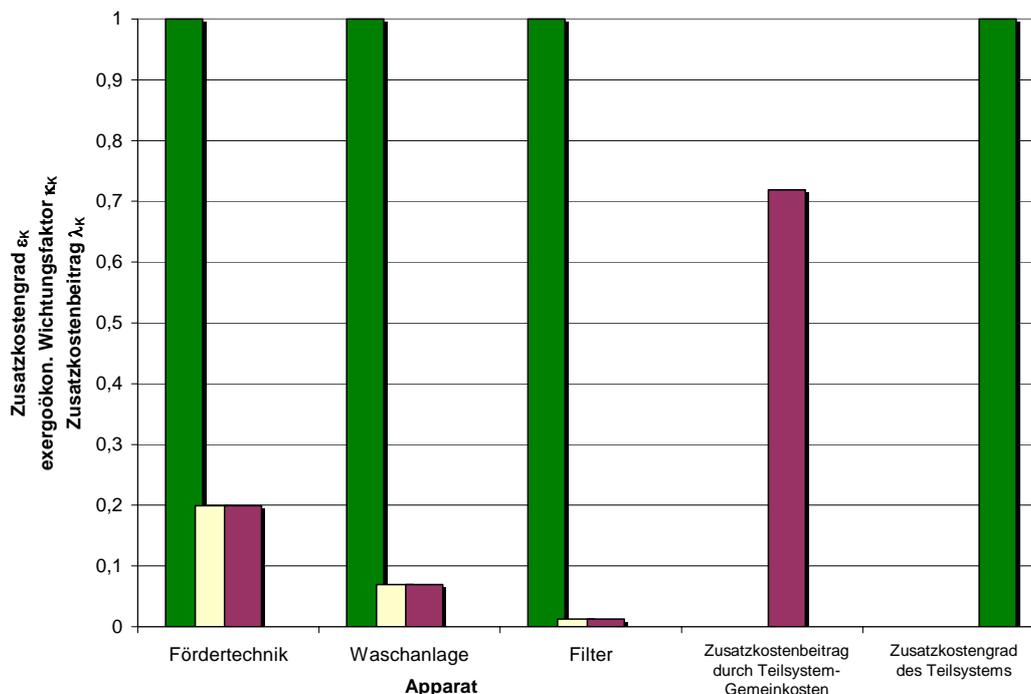


Abbildung 4.43: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Aufbereitung“

Der Pyrolysereaktor dominiert das zweite Teilsystem, wie die exergetischen Analyse zeigte. Durch die chemische Umwandlung der Altreifen und den Einsatz von Elektroenergie treten hier Exergiekosten von 1 006 690 EUR/a auf, die zu einem Wichtungsfaktor innerhalb des Teilsystems von 0,9416 führen. Bedingt durch den Verlustgrad und die Größe des Apparates wird der Verlustbeitrag von 0,0542 von den Exergieverlustkosten (Dissipation der Elektroenergie) und den Investitionskosten dominiert. Einen weiteren nennenswerten Zusatzkostenbeitrag liefert der Trockner mit

0,0365, wobei auch hier Exergieverlustkosten und Investitionskosten, die sich die Zusatzkosten hälftig teilen, entscheidend sind (siehe Anlage 12-5).

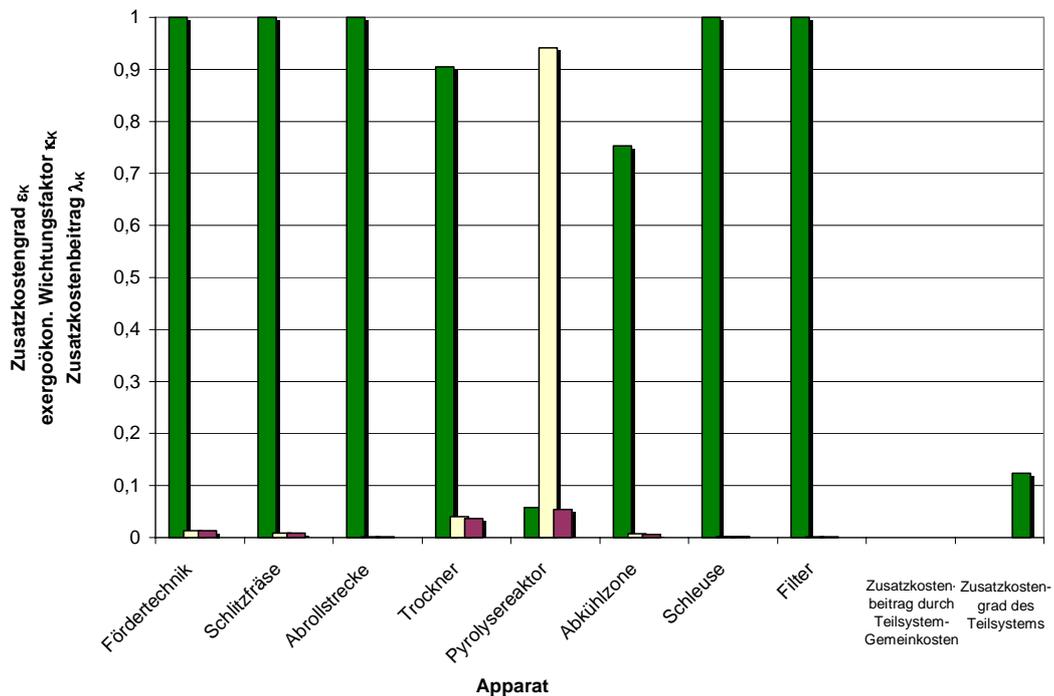


Abbildung 4.44: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Thermische Strecke“

Die Abkühlzone, die einen Zusatzkostengrad von 0,7531 aufweist, trägt aufgrund ihres geringen Wichtungsfaktor nicht wesentlich zum Zusatzkostengrad des Teilsystems bei. Alle anderen Apparate des Teilsystems sind durch einen Verlustgrad von eins gekennzeichnet, haben aber aufgrund ihres geringen exergoökonomischen Wichtungsfaktors entsprechend kleine Zusatzkostenbeiträge und damit einen sehr geringen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Damit sind ökonomische Verbesserungen hauptsächlich durch eine Verringerung der Zusatzkosten im Trockner und im Pyrolysereaktor erreichbar, so dass der Einsatz der Elektroenergie und der apparative Aufwand als Ansatzpunkte dienen werden.

Innerhalb des dritten Teilsystems zeigen sich näherungsweise gleiche Zusatzkostenbeiträge der Apparate von ca. 0,24, da im Wesentlichen die Investitionskosten den Zusatzkostengrad bestimmen und die Apparate ähnliche Investitionen erfordern. Da die anderen Zusatzkostenanteile vernachlässigbar sind, ist für eine Kostensenkung im Teilsystem allein der Anteil der Investitionskosten zu hinterfragen.

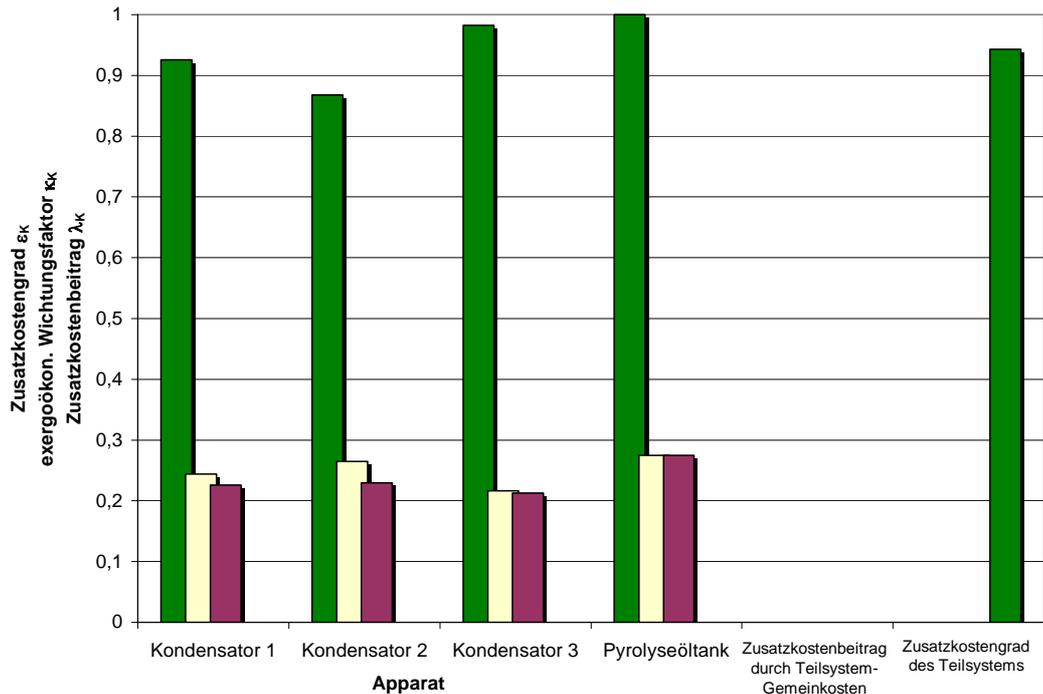


Abbildung 4.45: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Rohgasbehandlung“

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit des vierten Teilsystems ist das Blockheizkraftwerk, das neben großen Exergieverlusten auch einen hohen investiven Aufwand verursacht (siehe Anhang 12-7).

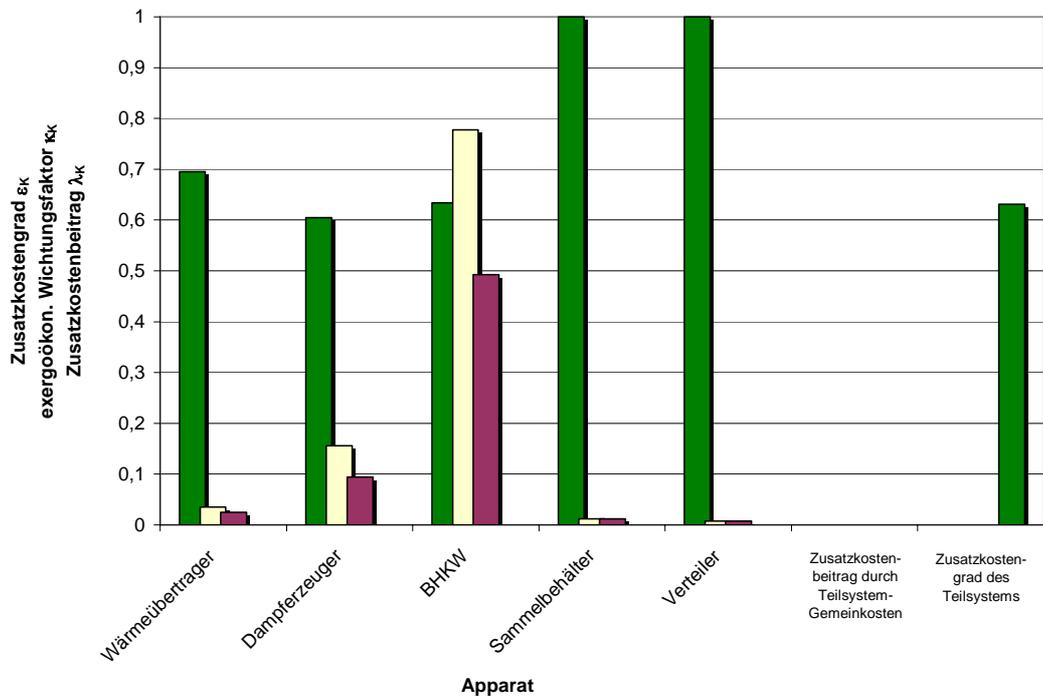


Abbildung 4.46: Exergetische Kennzahlen des Teilsystems „Energieerzeugung“

Dies führt bei einem Zusatzkostengrad von 0,6336 und einem exergoökonomischen Wichtungsfaktor von 0,7773 zu einem Zusatzkostenbeitrag von 0,4925 bei einem Zusatzkostengrad des Teilsystems von 0,6308. Folglich hat jede ökonomische Verbesserung am BHKW einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Stoff- und Energiewandlung, zumal die erzeugte Elektroenergie als Exergiekosten in diversen Prozessen im System in Erscheinung tritt. Jedoch sind durch den Verbrennungsprozess die Exergieverlustkosten bereits im Wesentlichen festgelegt. Einen weiteren bedeutenden Zusatzkostenbeitrag von 0,0941 weist der Dampfererzeuger auf, wobei hier die Exergieverlustkosten aufgrund der großen Temperaturdifferenzen die anderen Zusatzkostenanteile überwiegen (siehe Anhang). Eine Vorwärmung des Speisewassers wäre exergetisch günstig, würde jedoch zusätzliche apparative Aufwendungen erfordern.

Da die Apparate im Teilsystem „Feststoffstrecke“ nur der Produktaufbreitung und Produktkonditionierung dienen, lässt sich kein exergetischer Nutzen angeben, so dass ausschließlich Zusatzkosten anfallen, was die Zusatzkostengrade von eins dokumentieren. Dominierend sind hier die Personal- und Wartungskosten, die sich als Gemeinkosten des Teilsystems zeigen.

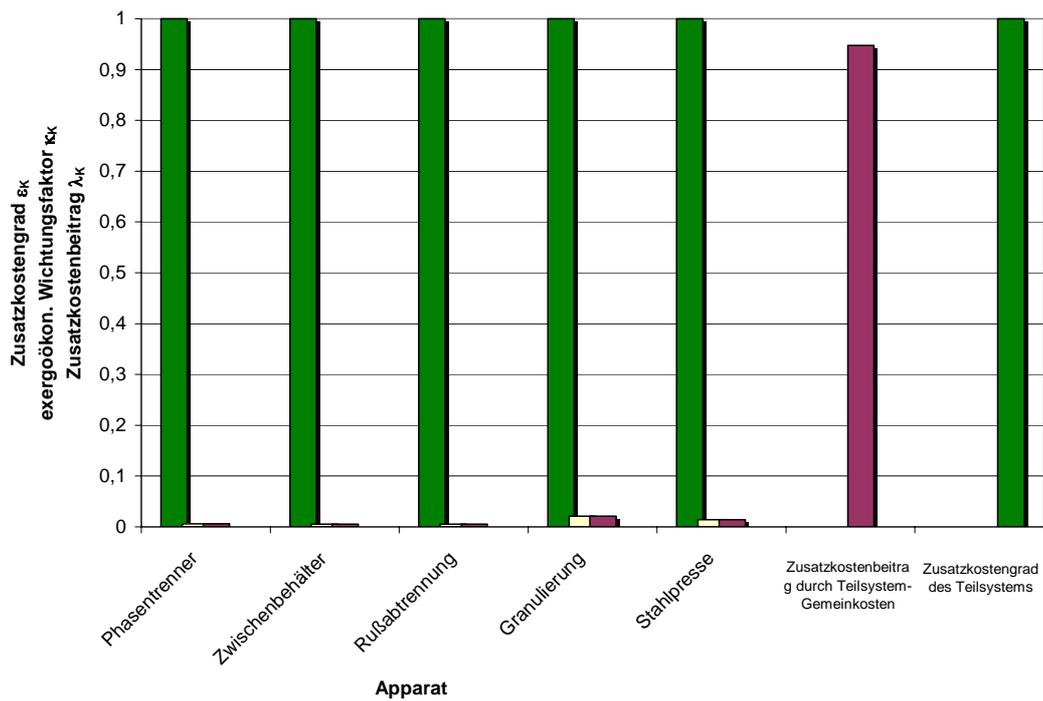


Abbildung 4.47: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems „Feststoffstrecke“

4.3.3.5 Exergieströme

Neben der Analyse der Hierarchiestufen der Verwertungsanlage lässt sich auch die Kostenentwicklung im Verfahren untersuchen. Dies soll mit Hilfe des nachfolgenden Balkendiagramms geschehen, das den Basiskostenfaktor von ausgewählten Haupt- und Zwischenprodukten im Verfahren darstellt.

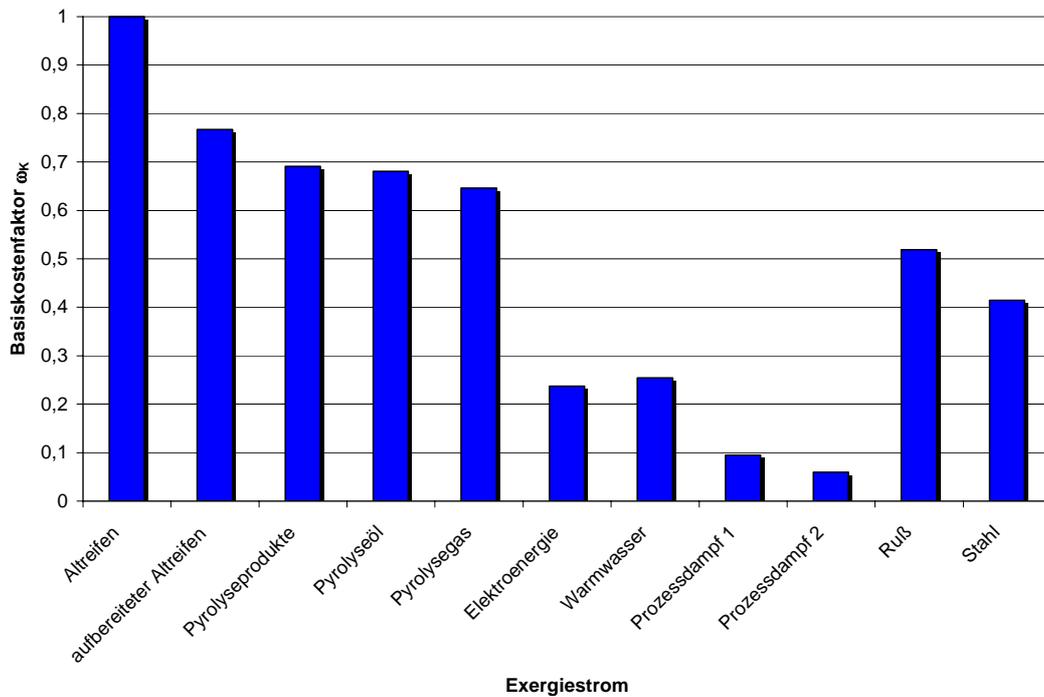


Abbildung 4.48: Basiskostenfaktoren der Ströme

Die in das System eintretenden Altreifen weisen einen Basiskostenfaktor von eins auf, da noch keine Zusatzkosten des Systems angefallen sind. Bereits nach der Aufbereitung der Einsatzstoffe sinkt der Faktor auf 0,767 ab, da Zusatzkosten auf diesen Strom umgelegt wurden. Insbesondere die oben diskutierten Personalkosten des Teilsystems „Aufbereitung“ lassen den Zusatzkostenanteil an den Gesamtkosten ansteigen. Die gesamten Pyrolyseprodukte mit einem Basiskostenfaktor von 0,691 dokumentieren die Zusatzkosten des Umwandlungsprozesses. Der weitere Bearbeitungsweg der Produkte im System spiegelt sich auch in der entsprechenden Stromkennzahl wider. Das Pyrolyseöl und das Pyrolysegas (im Zustand vor dem BHKW) erfordern einen geringen Bearbeitungsaufwand, was die Basiskostenfaktoren von 0,681 bzw. 0,646 zeigen. Hingegen erfordern die Endprodukte Ruß und Stahl einen größeren ökonomischen Aufwand im System, so dass nur 51,9% bzw. 41,5% der Gesamtkosten aus naturgesetzlich bedingten Kosten bestehen. Der Basiskostenfaktor der Elektroenergie von 0,237 verdeutlicht die großen Zusatzkosten, die mit der Erzeugung verbunden sind. Der geringe Anteil der Basiskosten an den Gesamtkosten des Warmwassers und

des erzeugten Prozessdampfes ist ein Indiz für den relativ großen ökonomischen Aufwand zur Bereitstellung dieser Nebenprodukte. Ökonomisch vorteilhaft ist es also, den Anteil des Pyrolyseöl an den Produkten zu maximieren. Da der Stahl und der Ruß zwangsläufig bei der Koppelproduktion mit anfallen, besteht daher die Aufgabe, den Einsatz von Elektroenergie im System zu minimieren, um die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu steigern.

4.3.3.6 Kostenallokation

Einen bedeutenden Einfluss auf die Analyseergebnisse hat die Wahl der Hierarchieebene, auf der die Kosten verteilt werden. Um dies zu belegen, werden in der nachfolgenden Tabelle die Exergiepreise der Produkte der Verwertungsanlage verglichen, die sich bei einer exergetischen Kostenverteilung auf den Hierarchiestufen Gesamtsystemebene (TS), Teilsystemebene (SS) und Apparateebene (U) ergeben.

Tabelle 4.3: Hierarchieebene und Kostenallokation

Produkt	Exergiepreis TS [€/kWh]	Exergiepreis SS [€/kWh]	Exergiepreis U [€/kWh]
Prozessdampf I	0,0234	0,0211	0,2053
Pyrolyseöl	0,0234	0,0211	0,0209
Prozessdampf II	0,0234	0,0587	0,1034
Fernwärme	0,0234	0,0587	0,0465
Elektroenergie	0,0234	0,0587	0,0485
Ruß	0,0234	0,0253	0,0253
Stahl	0,0234	0,0253	0,0259

Bei einer exergetischen Kostenallokation auf der Gesamtsystemebene erhält man einen einheitlichen Exergiepreis, mit dem alle Produktexergieströme bewertet werden. Nachteilig an dieser Vorgehensweise ist, dass der unterschiedlich große Aufwand, mit dem die Exergieströme im System erzeugt werden, hier keinen Eingang in die Kostenverteilung findet. Jedoch kann eine derartige

Kostenverteilung auch angewandt werden, falls die Anlage als eine Funktionseinheit betrachtet wird oder eine detaillierte Analyse der Kosten nicht erforderlich ist.

Eine erste Differenzierung des spezifischen Exergiepreises erhält man, wenn die Produkte mit dem mittleren Exergiepreis des Teilsystems, aus dem sie austreten, bewertet werden. Es zeigt sich bereits anhand der Hauptprodukte Pyrolyseöl und Ruß, dass sich die Berücksichtigung des produktspezifischen Aufwandes in den Exergiepreisen niederschlägt. Da die Bearbeitung des Rußes im System mit einem höheren ökonomischen Aufwand verbunden ist als die Kondensation des Öls, ist der spezifische Exergiepreis des Rußes auf Teilsystembasis höher als auf Gesamtsystemebene. Noch detaillierter ist die exergetische Kostenallokation auf der Apparateebene, da dann keine Mittelung der Exergiepreise die Aufteilung beeinflusst. Daher lässt sich eine preisliche Differenzierung beispielsweise zwischen Ruß und Stahl erkennen, die beide aus dem fünften Teilsystem an die Umgebung abgegeben werden. Der Stahlstrom wird bei dieser Kostenverteilung stärker belastet, da die Exergieverluste für die Differenzierung entscheidend sind und der Aufwand an Elektroenergie bei Stahlgurtpresse den der Granulierung übersteigt. Weiterhin zeigt sich bei der Kostenallokation auf der untersten Hierarchieebene, dass die Nebenprodukte, wie oben bereits diskutiert, einen verhältnismäßig hohen ökonomischen Aufwand verursachen. Dies zeigt sich beispielsweise bei den Kosten des Prozessdampfes I, wo auf einen relativ kleinen Exergiestrom aufgrund der wandlungsorientierten Transitbereinigung alle Zusatzkosten des Dampferzeugers umgelegt werden.

Letztlich kann durch einen Vergleich mit den Marktpreisen ermittelt werden, ob die Erzeugung kostenintensiver Nebenprodukte ökonomisch günstig ist oder eventuell durch eine Umstellung des Produktprogramms vermieden werden kann, falls die Kosten die Markt erzielbaren Erlöse übersteigen.

4.3.3.7 Einfluss des Exergiepreises

Zusätzlich zur eigentlichen exergoökonomischen Bewertung lässt sich das vorhandene Anlagenmodell auch zum Studium der Sensitivität der oben genannten Einflussgrößen nutzen. Durch die naturgesetzlich begründete Modellierung lassen sich die Auswirkungen von Änderungen interner und externer Einflussfaktoren auf die Exergoökonomie der Anlage prüfen. Beispielhaft soll dies anhand des Exergiepreises des Abfallstoffes dokumentiert werden.

Falls der Exergiepreis nicht 1 Cent pro kWh, sondern die Exergie kostenlos zur Verfügung steht, ergibt sich folgendes Bild: Der Zusatzkostengrad steigt auf eins, da keine Basiskosten in das System eintreten und folglich die naturgesetzlichen Minimalkosten der Produkte ebenfalls null sind. Alle Kosten, die von den Produkten getragen werden, sind daher Zusatzkosten. Dabei umfassen die

Investitionskosten einen Zusatzkostenbeitrag von 0,304, während die Personal- und Wartungskosten den komplementären Beitrag von 0,696 stellen. Unter diesen Rahmenbedingungen fallen keine Exergieverlustkosten an, so dass nur durch Senkung der Systemkosten der ökonomische Aufwand verringert werden kann. Dabei ist jedoch zu beachten, dass steigende Exergieverluste die Produktexergie verringern und zu steigenden spezifischen Systemkosten führen.

Die exergoökonomische Situation ändert sich, wenn die Altreifen einen Exergiepreis von 0,02 EUR je kWh aufweisen. Das Dreieckdiagramm zeigt, dass der Zusatzkostengrad des Gesamtsystems auf 42 % gesunken ist. Dieser Effekt lässt sich durch die wesentlich höheren Basiskosten des Systems bei konstanten Investitions- und Personalkosten begründen. Die Verteilung der Zusatzkostenkomponenten bestätigt dies. So ist der Anteil der Zusatzkosten durch Exergieverluste gestiegen, während die Anteile der Systemkosten entsprechend gesunken sind.

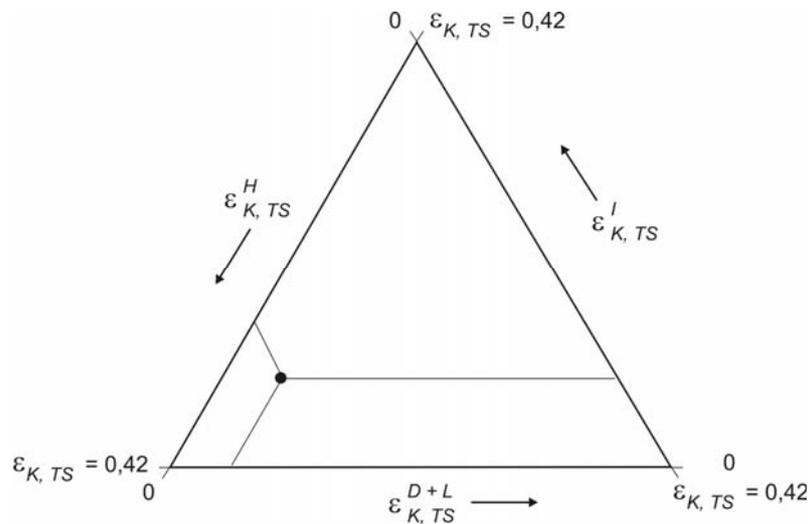


Abbildung 4.49: Zusatzkostenanteile bei einem Abfallstoffpreis von 0,02 EUR/kWh

4.3.3.8 Verbesserungsmöglichkeiten

Die Analyse des vorgestellten Verfahrens der Altreifenpyrolyse demonstriert, dass eine kombinierte stoffliche und energetische Nutzung von Abfallstoffen unter exergetischen Gesichtspunkten vorteilhaft ist. Durch die Verfahrenswahl sind Exergieverluste in der Pyrolyse und der Verbrennung der Pyrolysegase im BHKW jedoch unvermeidlich. Die exergoökonomischen Kennzahlen der Untersuchung zeigen vor allem folgende Verbesserungspotentiale an:

- Der Produktstrom der Elektroenergie, die zum überwiegenden Teil verfahrenintern verwendet wird, weist einen Basiskostenfaktor von lediglich 0,237 auf. Folglich ist eine Mini-

mierung des Elektroenergieeinsatzes für die ökonomische Effektivität des Verfahrens günstig. In diesem Zusammenhang ist besonders der Elektroenergieeinsatz im Pyrolysereaktor, in der Produktkonditionierung sowie in der Schlitzfräse zu berücksichtigen.

- Die Aufbereitung der Altreifen ist mit einem erheblichen ökonomischen Aufwand verbunden, der bei einer Verfahrensvariante ohne diese Reinigungsstufe eingespart werden kann. Allerdings beeinflusst die Verschmutzung der Altreifen die Qualität des in der Pyrolyse erzeugten Rußes.
- Der Pyrolysereaktor ist aufgrund seines Wichtungsfaktors entscheidend für die thermodynamische und die ökonomische Effizienz des Verfahrens. Eine verbesserte Isolierung verhindert Wärmeverluste nach außen und senkt den Elektroenergiebedarf der Pyrolyse. Alternativ ist auch eine direkte Beheizung des Pyrolysereaktors zu prüfen, da so die Exergieverluste und die Investitionskosten des BHKW vermieden werden können.
- Die Nutzung der thermischen Exergie der Pyrolysegase im Kondensator 1 des Teilsystems „Rohgasbehandlung“ zur Dampferzeugung ist aufgrund der großen Temperaturdifferenz mit großen Exergieverlusten verbunden. Eine Nutzung des vorgewärmten Wassers aus Kondensator 2 als Ausgangspunkt für die Dampferzeugung kann diese Verluste deutlich reduzieren.
- Die Aufbereitung der Altreifen und die Produktkonditionierung sind mit hohen Zusatzkosten durch Personal- und Wartung verbunden. Eine weitere Automatisierung dieser Prozessschritte kann diese Kosten senken, wobei jedoch zusätzliche Investitionskosten anfallen.

5 Zusammenfassung

Ausgehend von der Feststellung, dass alle Verfahren der Energie- und Stoffwandlung mit thermodynamischen Verlusten und ökonomischen Aufwendungen verbunden sind, ergibt sich die Notwendigkeit einer umfassenden Analyse und Bewertung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zwischen der Exergie als thermodynamische Zustandsgröße und der Ökonomie vielfältige Zusammenhänge bestehen, die für eine thermodynamisch-ökonomische Modellbildung genutzt werden können. Beginnend mit dem neoklassischen Wirtschaftsmodell als geschlossenes Kreislaufmodell wird unter Einbeziehung ökologischer Rahmenbedingungen ein ökonomisch-ökologisches Modell abgeleitet, dass unter Verwendung der Zustandsgröße Exergie zum exergetischen Wirtschaftsmodell weiterentwickelt wird.

Da sich die energie- und stoffwandelnden Verfahren durch einen hohen Grad an Komplexität auszeichnen, ist es für die Bewertung günstig, eine hierarchisch gegliederte Systemstruktur für die Bilanzierung zu verwenden. Die Ziele der Methodik liegen in der Bewertung der thermodynamischen Effizienz der Struktureinheiten durch den Bezug zum reversiblen Prozess, der Lokalisierung der Umwandlungsverluste im System, der Einschätzung der Wirtschaftlichkeit und in der Entwicklung einer verursachungsgerechten und naturwissenschaftlich begründbaren Kostenallokation bei Kuppelproduktion.

Für den thermodynamischen Teil der Bewertungsaufgabe wird die Zustandsgröße Exergie verwendet, da sie die Aussagen der beiden Hauptsätze der Thermodynamik verbindet. Die Exergie ist definiert als der unbeschränkt umwandelbare Teil der Energie, der aus einer beliebigen Energieform bei reversibler Wechselwirkung mit der Umgebung gewinnbar ist, und eignet sich daher als Qualitätsmaß der Energie. Durch den Umgebungsbezug der Exergie ist es notwendig, einen Umgebungszustand zu definieren, der sich durch die Umgebungstemperatur T_U mit 293,15K, den Umgebungsdruck p_U mit 101,325 kPa und durch eine stoffliche Umgebung aus feuchter Luft, Wasser und benötigten Feststoffen charakterisieren lässt.

Mit Hilfe dieser Zustandsgröße lassen sich Exergiebilanzen für alle Bilanzräume aufstellen, die aufgrund der im Prozessablauf auftretenden Irreversibilitäten nur mit einem entsprechenden Verlustterm geschlossen werden können. Darüber hinaus lassen sich alle aus dem Bilanzraum austretenden Exergieströme unter Berücksichtigung ökonomisch motivierter Nutzenkalküle in Produkt- und Abproduktströme unterscheiden. Eine Verbesserung der Aussagekraft derartiger Bilanzen ist durch die genauere Bestimmung des im Bilanzraum umwandelbaren Teils der insgesamt eintretenden Exergie möglich. Dazu werden die anteilsorientierte, die umwandlungsorientierte und die potentialorientierte Variante der exergetischen Transitbereinigung diskutiert.

Die Analyse von komplexen Systemen der Energie- und Stoffwandlung macht die gesonderte Betrachtung der äußeren Exergieverluste erforderlich. Um eine verursachungsgerechte Zuordnung zu erzielen, werden direkte und indirekte äußere Exergieverluste unterschieden. Durch diese Vorgehensweise lässt sich die Basisexergie eines Stoff- oder Energiestromes, die den minimalen exergetischen Aufwand seiner Erzeugung beschreibt, von den akkumulierten Exergieverlusten des Stromes unterscheiden. Zur Evaluierung der Elemente des untersuchten Systems stehen neben dem exergetischen Verlustgrad als Effektivitätskennzahl, die die Exergieverluste auf die eingesetzte Feedexergie bezieht, Kennzahlen zur Einordnung der Bedeutung des betrachteten Elementes innerhalb des Systems zur Verfügung. Der exergetische Wichtungsfaktor bildet das Verhältnis der Feedexergie des Elementes zur Feedexergie des Systems ab und charakterisiert die Bedeutung des untersuchten Bilanzraums innerhalb der Hierarchie. Der exergetische Verlustbeitrag als Produkt von Verlustgrad und Wichtungsfaktor bewertet die Bedeutung der im Bilanzraum auftretenden Verluste für die Effektivität des übergeordneten Systems. Zusätzlich bietet sich die Bewertung von Exergieströmen im System mit Hilfe des Basisexergiefaktors an, der die Basisexergie zum exergetischen Gesamtaufwand, der Totalexergie, ins Verhältnis setzt. Ein Vergleich mit alternativen exergetischen Bewertungsmethoden wie der Matrixformulierung und der Lebenszyklusanalyse schließt den thermodynamischen Teil der Arbeit ab.

Das abgeleitete exergetische Wirtschaftsmodell wird unter Einbeziehung der ökonomischen Bewertungsgröße Kosten genutzt, um die ökonomische Dimension der Bewertungsaufgabe zu erfüllen. Dazu werden in der exergoökonomischen Betrachtungsweise die Kostenarten Exergiekosten, Investitionskosten sowie Personal- und Wartungskosten berücksichtigt, wobei die exergieunabhängigen Kosten als Systemkosten bezeichnet werden. Für die Kosten werden in Analogie zur Exergiebilanz Kostenbilanzen für alle Struktureinheiten des untersuchten Verfahrens aufgestellt. Auch in ökonomischer Hinsicht ist es für die Aussagekraft derartiger Bilanzen günstig, die vom Bilanzraum zu beeinflussenden Kosten herauszustellen und mit Hilfe der exergetischen Transitbereinigung einen Kostentransit zu definieren. Die Kosten von Kuppelproduktionen werden im Modell exergetisch auf die Produktströme aufgeteilt.

Um eine exergoökonomische Bewertung vornehmen zu können, ist die Festlegung einer Bewertungsbezugsgröße unverzichtbar. Daher wurden die Basiskosten als minimale Kosten zur Erzeugung eines Produktexergiestromes definiert, die für einen reversiblen Prozess, der keine Systemkosten erfordert, anfallen. Mit der Aufteilung der Gesamtkosten in Basis- und Zusatzkosten ist es möglich, die ökonomische Effektivität der Stoff- und Energiewandlung in einem Bilanzraum zu bewerten. Dazu wird als Kennzahl der Zusatzkostengrad verwendet, der die Exergieverlustkosten, die Investitionskosten sowie die Personal- und Wartungskosten auf die transitbereinigten Gesamtkosten des Bilanzraumes bezieht.

Für die Analyse der Kostenentwicklung im Verfahren und zur Lokalisierung der Zusatzkosten in einem komplexen System stehen mit dem exergoökonomischen Wichtungsfaktor und dem Zusatzkostenbeitrag zwei Kenngrößen zur Verfügung, die die Bedeutung des untersuchten Bilanzraumes und der darin auftretenden Zusatzkosten im Verfahren bewerten. Zusätzlich kann der Basiskostenfaktor, der das Verhältnis von Basiskosten zu Gesamtkosten charakterisiert, als stromorientierte Bewertungsziffer genutzt werden. Eine vergleichende Betrachtung der Methode mit alternativen Bewertungsmodellen beschließt die Modelldiskussion.

Die Anwendung des vorgestellten exergoökonomischen Bewertungsmodells wird anhand zweier Beispiele aus dem Bereich der Abfallverwertung demonstriert. Die dazu erforderlichen Berechnungen wurden mit dem Programm Mathcad durchgeführt.

Die exergoökonomische Analyse der Vergasungsanlage für Abfallstoffe aus der Papierindustrie zeigt, dass die thermodynamischen Verluste, die sich in einem exergetischen Verlustgrad des Verfahrens von 63 % manifestieren, vor allem durch die chemischen Umwandlungsprozesse bedingt sind. Die ökonomische Bewertung, die zusätzlich noch den hohen Anteil der Systemkosten an den Gesamtkosten des Verfahrens berücksichtigt, führt zu einem Zusatzkostengrad von 93 %. Eine detaillierte Betrachtung der Elemente des Systems und Basiskostenfaktoren der Stoff- und Energieströme verdeutlicht die Kostenentwicklung und zeigt, dass die Zusatzkosten des Verfahrens von den Investitions- sowie den Personal- und Wartungskosten dominiert werden. Aus den berechneten Kennzahlen werden Verbesserungsvorschläge abgeleitet.

Das zweite Beispiel behandelt eine projektierte Pyrolyseanlage für Altreifen. Durch die kombinierte stofflich-energetische Nutzung des Abfallstoffes und durch die kaskadenförmige Wärmenutzung im Verfahren ergibt sich ein Verlustgrad von 0,0858. Eine hierarchisch strukturierte Analyse verdeutlicht, dass vor allem die Pyrolysestufe und die Nutzung des Pyrolysegases durch Verbrennung im Blockheizkraftwerk die Exergieverluste verursachen. Durch die ökonomische Betrachtung werden die Personal- und Wartungskosten als bestimmender Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit herausgestellt. Die Variation des Exergiepreises des Einsatzstoffes verdeutlicht dessen großen Einfluss auf die Verteilung der Zusatzkostenanteile und die entsprechenden Kostensenkungsstrategien.

Damit steht eine Methodik zur Verfügung, die unter Einbeziehung der naturgesetzlichen Rahmenbedingungen der Ökonomie eine thermodynamisch-ökonomischen Analyse ermöglicht und zur umfassenden exergoökonomischen Bewertung von Verfahren der Energie- und Stoffwandlung genutzt werden kann.

LITERATURVERZEICHNIS

- [AHR77] Ahrendts, J.: Die Exergie chemisch reaktionsfähiger Systeme. VDI-Forschungsheft 579. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1977.
- [ALE88a] Alefeld, G.: Probleme mit der Exergie. In: BWK 40(1988)3, 72-80.
- [ALE88b] Alefeld, G.: Die Exergie und der II. Hauptsatz der Thermodynamik. In: BWK 40(1988)11, 458-464.
- [ANT00] Antes, R.: Die Flußkostenrechnung als Instrument betrieblicher Nachhaltigkeit? In: Zabel, H.-U. (Hrsg.): Sustainability als interdisziplinäre Herausforderung. Halle (Saale): Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Universitätszentrum für Umweltwissenschaften (UZU), 2000.
- [ARE02] Arena, A.P.; Correa, E.N.: Thermoeconomic Analysis of Different Technologic Alternatives for Performance Improvement of a Combined Cycle Power Plant. In: Proceedings of ECOS 2002, 242-249.
- [ATK01] Atkins, P.W.: Physikalische Chemie. 3. Aufl., Weinheim [u.a.]: Wiley-VCH, 2001.
- [BAE88] Baehr, H.D.: Probleme mit der Exergie? In: BWK 40(1988)11, 450-457.
- [BAE96] Baehr, H.D.: Thermodynamik. 9. Aufl., Berlin [u.a.]: Springer, 1996.
- [BAL02] Balestieri, J.P.; Colle, S.: Topological Interpretation of Exergoeconomic Techniques. In: Proceedings of ECOS 2002, 200-206.
- [BAU01a] Baumgärtner, S.; Schiller, J.: Kuppelproduktion. Ein Konzept zur Beschreibung der Entstehung von Umweltproblemen. In: Ökonomische Naturbewertung (Jahrbuch ökologische Ökonomik 2), Marburg: Metropolis-Verlag, 2001.
- [BAU01b] Baumgärtner, S.; Dyckhoff, H.; Faber, M.; Proops, J.; Schiller, J.: The Concept of Joint Production and Ecological Economics. Ecological Economics 36(2001), 365-372.
- [BEJ96] Bejan, A.; Tsatsaronis, G.; Moran, M.: Thermal Design and Optimization. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.

- [BIN94] Binswanger, M.: Das Entropiegesetz als Grundlage einer ökologischen Ökonomie. In: Beckenbach, F.; Diefenbacher, H.: Zwischen Entropie und Selbstorganisation: Perspektiven einer ökologischen Ökonomie. Marburg: Metropolis-Verlag, 1994.
- [BIT01] Bittrich, P.: Energietransformation. Aachen: Shaker, 2001, zugl. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Habilitationsschrift, 2000.
- [BOS98] Bosnjakovic, F.; Knoche, K. F.: Technische Thermodynamik. Teil I. 8. Aufl., Darmstadt: Steinkopff, 1998.
- [BRE96] Breidenbach, L.: Exergetisch-ökonomische Beurteilung von Meerwasserentsalzungsanlagen bei der kombinierten Trinkwasser- und Stromerzeugung. TH Aachen, Diss., 1996.
- [BRO94] Brodyansky, V.M.; Sorin, M.V.; LeGoff, P.: The Efficiency of Industrial Processes: Exergy Analysis and Optimization. Amsterdam: Elsevier, 1994.
- [BUN96] Bundesumweltministerium; Umweltbundesamt (Hrsg.): Handbuch Umweltkostenrechnung. München: Vahlen, 1996.
- [BUN97] BUND; Misereor (Hrsg.): Zukunftsfähiges Deutschland: Ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung. Studie des Wuppertal-Instituts für Klima, Umwelt, Energie GmbH. 4. Aufl., Basel [u.a.]: Birkhäuser, 1997.
- [BUN01] Bundesumweltministerium; Umweltbundesamt (Hrsg.): Handbuch Umweltcontrolling. 2. Aufl., München: Vahlen, 2001.
- [CAR24] Carnot, Sadi: Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen (1824). Nachdruck, Braunschweig: Vieweg & Sohn, 1988.
- [CEN02] Cengel, Y.A.; Boles, M.A.: Thermodynamics: An Engineering Approach. 4th ed., New York: McGraw-Hill, 2002.
- [CHA03] Chang, H.; Chuang, S.: Process Analysis Using the Concept of Intrinsic and Extrinsic Exergy Losses. In: Energy 28(2003), 1203-1228.
- [COE02] Cornelissen, R. L.: Thermodynamics and Sustainable Development. The Use of Exergy Analysis and the Reduction of Irreversibility.

www.ub.utwende.nl/webdocs/wb/1/t0000003.pdf (29.10.2002).

- [COS01] Costanza, R.; Cumberland, J.; Daly, H.; Goodland, R.; Norgaard, R.: Einführung in die ökologische Ökonomik. Stuttgart: Lucius & Lucius, 2001.
- [COT02] Corti, A.; Lombardi, L.: Performance Analysis of a Biomass Integrated Gasification Combined Cycle with reduced CO₂ Emmissions. In: Proceedings of ECOS 2002, 781-787.
- [DIN01] Dincer, I.; Cengel, Y. A.: Energy, Entropy and Exergy concepts and Their Roles in Thermal Engineering. In: Entropy 3(2001), 116-149.
- [DIN02] Dincer, I.: The Role of Exergy in Energy Policy Making. In: Energy Policy 30(2002), 137-149.
- [DIH97] Dinkelbach, W.; Rosenberg, O.: Erfolgs- und umweltorientierte Produktions-theorie. 2., überarb. Aufl., Berlin [u.a.]: Springer, 1997.
- [DYC98] Dyckhoff, H.: Grundzüge der Produktionswirtschaft. 2. Aufl., Berlin [u.a.]: Springer, 1997.
- [DYC00] Dyckhoff, H.: Umweltmanagement. Zehn Lektionen in umweltorientierter Unternehmensführung. Berlin [u.a.]: Springer, 2000.
- [END00] Endres, A.; Querner, I.: Die Ökonomie natürlicher Ressourcen. 2. Aufl., Stuttgart [u.a.]: Kohlhammer, 2000.
- [ENQ93] Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt - Bewertungskriterien und Perspektiven für Umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft" des 12. Deutschen Bundestages: Verantwortung für die Zukunft: Wege zum nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Bonn: Economica-Verlag, 1993.
- [ELS92] Elsner, N.; Dittmann, A.: Grundlagen der technischen Thermodynamik. Band 1: Energiellehre und Stoffverhalten. 8. Aufl., Berlin: Akademie-Verlag, 1992.
- [FER01] Ferrari, S.; Genoud, S.; Lesourd, J.-B.: Thermodynamics and Economics: Towards Exergy-based Indicators of Sustainable Development. In: Schweiz. Zeitschrift für Volkswirtschaft und Statistik 137(2001)3, 319-336.

- [FRS02] Frangopoulos, C. A.; von Spakowsky, M. R.; Sciubba, E.: A Brief Review of Methods for the Design and Synthesis Optimization of Energy Systems. In: Proceedings of ECOS 2002, 306-316.
- [FRA86] Fratzscher, W.; Brodjanskij, V. M.; Michalek, K.: Exergie: Theorie und Anwendung. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1986.
- [FRA89] Fratzscher, W.: Energiewirtschaft für Verfahrenstechniker. 3. Aufl., Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1989.
- [FRA93] Fratzscher, W.; Picht, H.-P.: Stoffdaten und Kennwerte der Verfahrenstechnik. 4. Aufl., Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993.
- [FRA99] Fratzscher, W.; Michalek, K.: On the Way from Energy to Entropy Economics. In: Proceedings of ECOS 1999, 363-367.
- [FIS97] Fischer, H.; Wucherer, Ch.; Wagner, B.; Bursche, C.: Umweltkostenmanagement. Kosten senken durch praxiserprobtes Umweltcontrolling. München [u.a.]: Hanser, 1997.
- [GAG80] Gaggioli, R.A.: Thermodynamics. Second Law Analysis. Washington: American Chemical Society, 1980.
- [GEO71] Georgescu-Roegen, N.: The Entropy Law and the Economic Process. Cambridge: Harvard University Press, 1971.
- [GEO87] Georgescu-Roegen, N.: The Entropy Law and the Economic Process in Retrospect. Schriftenreihe des IÖW 5(1987), 4-31.
- [GHE02] Gherardelli, C.: Exergoökonomische Analyse und Bewertung von Schwefelsäureanlagen. TU Berlin, Diss., 2002.
- [GOL98] Van Goll, W.: Thermodynamics of Chemical References for Exergy Analysis. In: Energy Conversion & Management 39(1998), 1719-1728.
- [GRU76] Gruhn, G.; u.a.: Systemverfahrenstechnik I. Modellierung und Simulation verfahrenstechnischer Systeme. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1976.
- [GRU78] Gruhn, G.; u.a.: Systemverfahrenstechnik II. Bewertung, Optimierung und Synthese

- verfahrenstechnischer Systeme. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1978.
- [HAL01] Hall, C.; Lindenberger, D.; Kümmel, R.; Kroeger, T.; Eichhorn, W.: The Need to Reintegrate the Natural Sciences into Economics. www.dieoff.org/page228.pdf (05.03.03).
- [HAU04a] Hau, J.L.; Bakshi, B.R.: Expanding Exergy Analysis to Ecosystem Products and Services. www.che.eng.ohio-state.edu/~bakshi/ecec.pdf (12.11.04)
- [HAU04b] Hau, J.L.; Bakshi, B.R.: Promise and Problems of Exergy Analysis. www.che.eng.ohio-state.edu/~bakshi/EcolModel3.pdf (12.11.04)
- [HEB86] Hebecker, D.: Exergetische Analyse der Vinylchloridtrochnung. In: Chemische Technik, 38(1986)3.
- [HEB90] Hebecker, D.: Energieeinsparung durch energetische Analyse von chemisch-technologischen Verfahren. In: Energieanwendung 39(1990)7, 216-219.
- [HEB03] Hebecker, D.; Bittrich, P.: Thermoökonomische Analyse einer Bioenergie-Anlage. In: BWK 55(2003)5, 46-50.
- [HEB04] Hebecker, D.: Versuchsaufzeichnungen und Auslegungsdaten zur Altreifenpyrolyse. Material des Instituts für Umwelttechnik. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2004.
- [HEB05] Hebecker, D.; Bittrich, P.; Riedl, K.: Hierarchically Structured Exergetic and Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy Conversion Processes. In: Energy Conversion and Management 46(2005)7-8, 1247-1266.
- [HEB06] Hebecker, D.; Riedl, K.: Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Abfallstoffen der Papierindustrie über die thermische Vergasung. In: VDI-Berichte 1924. Fortschrittliche Energiewandlung und –anwendung 2006.
- [HEN83] Heinen, E.: Betriebswirtschaftliche Kostenlehre: Kostentheorie und Kostenentscheidungen. 6. Aufl., Wiesbaden: Gabler, 1983.
- [HEM94] Heinemann, V.: Zur Überführbarkeit des Entropiebegriffes in die Ökonomie. In: Beckenbach, F.; Diefenbacher, H.: Zwischen Entropie und Selbstorganisation: Per-

- spektiven einer ökologischen Ökonomie. Marburg: Metropolis-Verlag, 1994.
- [HES99] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung; Hessische Technologiestiftung GmbH: Flusskostenmanagement: Kostensenkung und Öko-Effizienz durch eine Materialflussorientierung in der Kostenrechnung. Wiesbaden: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung [u.a.], 1999.
- [HOL94a] Holub, H.-W.; Schnabl, H.: Input-Output-Rechnung: Input-Output-Analyse. München [u.a.]: Oldenbourg, 1994.
- [HOL94b] Holub, H.-W.; Schnabl, H.: Input-Output-Rechnung: Input-Output-Tabellen. 3. Aufl., München [u.a.]: Oldenbourg, 1994.
- [IMM90] Immler, H.: Vom Wert der Natur. Zur ökologischen Reform von Wirtschaft und Gesellschaft. 2. Aufl., Opladen [u.a.]: Westdt. Verlag, 1990.
- [IMM93] Immler, H.: Welche Wirtschaft braucht die Natur? Mit Ökonomie die Ökokrise lösen. Frankfurt am Main: Fischer, 1993.
- [IMM94] Immler, H.: Natur als Produktionsfaktor und als Produkt. Gedanken zu einer physisch begründeten Ökonomie. In: Biervert, B.; Held, M.: Das Naturverständnis in der Ökonomie. Frankfurt/Main, New York: Campus-Verlag, 1994, 241-526.
- [IMM98] Immler, H.; Hofmeister, S.: Natur als Grundlage und Ziel der Wirtschaft: Grundzüge einer Ökonomie der Reproduktion. Opladen [u.a.]: Westdt. Verlag, 1998.
- [JAE94] Jaeger, F.: Natur und Wirtschaft: Auf dem Weg zu einer ökologischen Marktwirtschaft. 2., neu bearb. Aufl., Chur [u.a.]: Rüegger, 1994.
- [KHA97] Khartchenko, N.: Umweltschonende Energietechnik. Würzburg: Vogel, 1997.
- [KLA98] Klauer, B.: Nachhaltigkeit und Naturbewertung: Welchen Beitrag kann das ökonomische Konzept der Preise zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit leisten? Heidelberg: Physica-Verlag, 1998.
- [KRO06] Kröner, Th.: Exergetische Bewertung einer Altreifenpyrolyseanlage. Studien- und Projektarbeit, Lehrstuhl für Energietechnik, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2006.

- [KRU95] Kruschwitz, L.: Investitionsrechnung. 6. Aufl., Berlin, New York: de Gruyter, 1995.
- [KUG90] Kugeler, K.; Phlippen, P.-W.: Energietechnik: technische, ökonomische und ökologische Grundlagen. Berlin [u.a.]: Springer, 1990.
- [KUN06] Kunde, F.: Exergoökonomische Bewertung einer Altreifenpyrolyseanlage. Studien- und Projektarbeit, Lehrstuhl für Energietechnik, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2006.
- [LEM03] Lems, S.; van der Kooi, H.J.; de Swaan Arons, J.: Quantifying Technological Aspects of Process Sustainability: A Thermodynamic Approach. In: Clean Techn. Environ. Policy 5(2003), 248-253.
- [LET98] Letmathe, P.: Umweltbezogene Kostenrechnung. München: Vahlen, 1998.
- [LOE00] Loew, T.; Strobel, M.: Flusskostenmanagement: Ein neuer Ansatz zur systematischen Kostensenkung durch Umweltentlastung. In: Fischer, K.; Schneidewind, U.: Umweltschutz im globalen Wettbewerb. Berlin [u.a.]: Springer, 2000.
- [LOE04] Loew, T.; Beucker, S.; Jürgens, G.: Vergleichende Analyse der Umweltcontrollinginstrumente Umweltbilanz, Umweltkennzahlen und Flusskostenrechnung.
www.ioew.de/publikationen/INTUS_Vergleich.pdf (12.10.04)
- [LUC04] Lucas, K.: Thermodynamik. Die Grundgesetze der Energie- und Stoffwandlungen. 4. Aufl., Berlin [u.a.]: Springer, 2004.
- [MAT98] Mathsoft Inc. (Hrsg.): Mathcad 8. User's Guide. Cambridge, 1998.
- [MIN02] Minciuc, E.; Wahlund, B.; Yan, J.: Exergy Analysis of a Tri-Generation Plant: A Case Study of the Existing Plant in Skelleftea. In: Proceedings of ECOS 2002, 917-924.
- [MUE95] Müller-Fürstenberger, G.: Kuppelproduktion: Eine theoretische und empirische Analyse am Beispiel der chemischen Industrie. Heidelberg: Physica-Verlag, 1995.
- [MUN91] Munsch, M.: Rechnergestützte exergetische Analyse, Bewertung und Optimierung verfahrenstechnischer Prozesse. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991.
- [NAE88] Näser, K.-H.; Lempe, D.; Regen, O.: Physikalische Chemie für Techniker und Ingenieure. 18. Aufl., Leipzig: Verlag für Grundstoffindustrie, 1988.

- [NAR02] Narin, B.; Göğüs, Y.A.: Application of the Method of Exergy Splitting to Cost Evaluation of a Retrofitted J-79 Engine as Cogeneration Unit. In: Proceedings of ECOS 2002, 192-199.
- [ODU00a] Odum, H.T.; Brown, M.T.; Brandt-Williams, S.: Handbook of Emergy Evaluation. Folio #1: Introduction and Global Budget.
www.ees.ufl.edu/cep/downloads/Folio%201.pdf (23.11.04)
- [ODU00b] Odum, H.T.: Handbook of Emergy Evaluation. Folio #2: Emergy of Global Processes. www.ees.ufl.edu/cep/downloads/Folio%202.pdf (23.11.04)
- [OEN97] Oenning, A.: Theorie betrieblicher Kuppelproduktion. Heidelberg: Physica-Verlag, 1997.
- [OTT69] Otte, F.: Exergetische Kostenaufteilungsmethode bei Koppelprozessen. TH Leuna-Merseburg, Diss., 1969.
- [PAU70] Pauer, W.: Grundlagen der Kraft- und Wärmewirtschaft. Dresden: Steinkopff, 1970.
- [PIL91] Piller, W.; Rudolph, M.: Kraft-Wärme-Kopplung. Zur Theorie und Praxis der Kostenrechnung. 2. Aufl., Frankfurt am Main: VWEW-Verlag, 1991.
- [PLA30] Planck, M.: Vorlesungen über Thermodynamik. 9. Aufl., Berlin, Leipzig: De Gruyter, 1930.
- [PRI76] Prinz, R.: Grundlagen der Exergieberechnung für die thermodynamische Bewertung von Stoff- und Energiewandlungen. TH Leuna-Merseburg, Diss., 1976.
- [RAD95] Radgen, Peter: Energiesystemanalyse eines Düngemittelkomplexes. Universität Duisburg, Diss., 1995.
- [RAN56] Rant, Z.: Exergie – ein neues Wort für technische Arbeitsfähigkeit. Forschung im Ingenieurwesen 22(1956), 36-37.
- [RIE02] Riedl, K.: Exergetische und thermoökonomische Bewertung der Vergasung von Spuckstoffen. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Diplomarbeit, 2002.
- [ROD80] Rodriguez, L.: Calculation of Available-Energy Quantities. In: American Chemical Society, Symposium on Theoretical and Applied Thermodynamics, 39-59, 1980.

- [ROP99] Ropohl, G.: Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik.. 2. Aufl., München, Wien: Hanser, 1999.
- [ROS02] Rosen, M.A.: Evaluating Energy and Greenhouse Gas Technologies with the Principles of Thermodynamics.
www.cussuc.ca/events/CCEO/graphics/26_rosen_paper.pdf (01.11.02).
- [ROS03] Rosen, M.A., Dincer, I.: Exergy-cost-energy-mass analysis of thermal systems and processes. In: Energy Conversion & Management 44(2003), 1633-1651.
- [RIV02a] Rivero, R; Rendon, C.: Exergoeconomic Analysis of a Crude Oil Combined Distillation Unit. In: Proceedings of ECOS 2002, 177-184.
- [RIV02b] Rivero, R.; Montero, G.; Garfias, M.: The Effect of Environmental Temperature on the Chemical Exergy of Hydrocarbons. In: Proceedings of ECOS 2002, 69-78.
- [ROY02] Roy-Aikins, J.: Thermoeconomic Optimization of a Hybrid Microturbine and Fuel Cell. In: Proceedings of ECOS 2002, 185-191.
- [SAR99] Sartorius, Ch.: Energie- und Stoffflüsse im ökologischen und ökonomischen Zusammenhang. In: Beckenbach, F.: Jahrbuch ökologische Ökonomik 1999. Band 1. Marburg: Metropolis, 425-452.
- [SCL00] Schwabl, F.: Statistische Mechanik. Berlin [u.a.]: Springer, 2000.
- [SCI01] Sciubba, E.: Using Exergy to Evaluate Environmental Externalities.
www.bygy.ntnu.no/indecol/formidling/seminarer/4lh_ntva/sciubba_paper.pdf (4.10.02).
- [SIE95] Siebert, H.: Economics of the Environment: Theory and Policy. 4. Aufl., Berlin [u.a.]: Springer, 1995.
- [SOE96] Söllner, F.: Thermodynamik und Umweltökonomik. Heidelberg: Physica-Verlag, 1996.
- [SOR93] Sorin, M; Brodyansky, V.M.; Valero, A.: Transit Exergy in the Costing Definition.
www.teide.cps.unizar.es/pub/publicir.nsf/cp0070.pdf (5.11.03).

- [SOR94] Sorin, M.; Sapundzhiev, C.; Paris, J.: Application of a New Exergy Analysis Method to a Flow Reversal SO₂ Converter. In: *Chemical Engineering Science* 49(1994)24, 5603-5613.
- [SOR98] Sorin, M.; Lambert, J.; Paris, J.: Exergy Flows Analysis in Chemical Reactors. In: *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 76(1998)3A, 389-395.
- [SOR99] Sorin, M.; Paris, J.: Integrated Exergy Load Distribution Method and Pinch Analysis. In: *Computers & Chemical Engineering* 23(1999), 497-507.
- [SPR98] Sprengler, T.: *Industrielles Stoffstrommanagement. Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung von Stoff- und Energieströmen in Produktionsunternehmen*. Berlin: E. Schmidt, 1998.
- [STE02] Steger, U. (Hrsg.): *Nachhaltige Entwicklung und Innovation im Energiebereich*. Berlin [u.a.]: Springer, 2002.
- [STR87] Ströbele, W.: *Rohstoffökonomik: Theorie natürlicher Ressourcen mit Anwendungsbeispielen*. München: Vahlen, 1987.
- [SZA88] Szargut, J.; Morris, D.R.; Steward, F.R.: *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*. New York [u.a.]: Hemisphere Publ. Corp., 1988.
- [TOR99] Torres, C.; Valero, A.; Serra, L.; Royo, J.: Structural Theory and Thermo-economic Diagnosis. In: *Proceedings of ECOS 1999*, 368-379.
- [TSA93] Tsatsaronis, G.: Thermo-economic Analysis and Optimization of Energy Systems. In: *Progress in Energy Combustion Science* 19(1993), 227-257.
- [TSA96] Tsatsaronis, G.: Exergoeconomics: Is it only a New Name? In: *Chemical Engineering & Technology* 19(1996), 163-169.
- [TSA99] Tsatsaronis, G.; Park, M.-H.: On Avoidable and Unavoidable Exergy Destructions and Investment Costs in Thermal Systems. In: *Proceedings of ECOS 1999*, 116-121.
- [TSA05] Tsatsaronis, G.; Kapanke, K.: Thermodynamic Analysis of a Novel Process with Integrated CO₂ Capture for the Production of Electric Power and Hydrogen. In: *Proceedings of IMECE 2005*, 1-8.

- [TSC03] Tschandl, M.; Posch, A. (Hrsg.): Integriertes Umweltcontrolling. Wiesbaden: Gabler, 2003.
- [VAL02a] Valero, A.; Ranz, L.; Botero, E.: An Exergetic Assessment of Natural Mineral Capital (1); Reference Environment – A Thermodynamic Model for a Degraded Earth. In: Proceedings of ECOS 2002, 54-68.
- [VAL02b] Valero, A.; Correas, L.; Zaleta, A.; Lazzaretto, A.; Verda, V.; Reini, M.; Rangel, V.: On the Thermo-economic Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions. In: Proceedings of ECOS 2002, 215-233.
- [VAL02c] Valero, A.: Thermo-economics as a Conceptual Basis for Energy-Ecological Analysis. www.teide.cps.unizar.es/pub/publicir.usf/cp0198.pdf (04.11.02).
- [VAL03a] Valero, A.; Carreras, A.: On Causality in Organized Energy Systems: I. Purpose, Cause, Irreversibility, Cost. www.teide.cps.unizar.es/pub/publicir.usf/cp0029a.pdf (05.11.03).
- [VAL03b] Valero, A.; Torres, C.: On Causality in Organized Energy Systems: II Symbolic Exergoeconomics. www.teide.cps.unizar.es/pub/publicir.usf/cp0029b.pdf (05.11.03).
- [VAU94] Vauck, W. R.; Müller, H. A.: Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik. 10. Aufl., Leipzig [u.a.]: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1994
- [VDI95] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Energietechnik: Kumulierter Energieaufwand. VDI-Berichte 1218. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995.
- [VDI97a] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 4600 – Kumulierter Energieaufwand. Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. In: VDI-Handbuch Energietechnik. Berlin: Beuth Verlag, 1997.
- [VDI97b] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 4600 – Kumulierter Energieaufwand. Beispiele (Entwurf). In: VDI-Handbuch Energietechnik. Berlin: Beuth Verlag, 1997.
- [VDI02] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen: VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 9. Aufl., Berlin [u.a.]: Springer, 2002.
- [VER02] Verda, V.; Borchiellini, R.: Exergetic and Economic Evaluation of Control Strategies

- for a Gas Turbine Plant. In: Proceedings of ECOS 2002, 234-241.
- [WAL86] Wall, G.: Exergy – A Useful Concept. www.exergy.se (01.11.02).
- [WAL88] Wall, G.: Exergy Flows in Industrial Processes. In: Energy 13(1988)2, 197-208.
- [WAL97] Wall, G; Gong, M.: On Exergetics, Economics and Optimization of Technical Processes to Meet Environmental Conditions. www.exergy.se (01.11.02).
- [WAL01a] Wall, G; Gong, M.: On Exergy and Sustainable Development – Part 1: Conditions and Concepts. In: Exergy Int. Journal 1(2001)3, 128-145.
- [WAL01b] Wall, G; Gong, M.: On Exergy and Sustainable Development – Part 2: Indicators and Methods. In: Exergy Int. Journal 1(2001)4, 217-233.
- [WAL02] Wall, G.: Conditions and Tools in the Design of Energy Conversion and Management Systems of a Sustainable Society. In; Energy Conversion & Management 43(2002), 1235-1248.
- [WAT00] Walter, W.: Einführung in die moderne Kostenrechnung. Grundlagen – Methoden – Neue Ansätze. 2. Aufl., Wiesbaden: Gabler, 2000.
- [WAN02] Wang, S.P.; Chen, Q.L.; Yin, Q.H.; Hua, B.: Theoretical Research on the Transfer Equation of Exergy Cost. In: Proceedings of ECOS 2002, 207-214.
- [WEI96] Weizsäcker, E.U. von; Lovins, A.B.; Lovins, L.H.: Faktor Vier: Doppelter Wohlstand – halbiertes Naturverbrauch. Der neue Bericht an den Club of Rome. 7. Aufl., München: Droemer Knaur, 1996.
- [WEP80] Wepfer, W. J.; Gaggioli, R. A.: Reference Datums for Available Energy. In: American Chemical Society, Symposium on Theoretical and Applied Thermodynamics 1980, 77-92.
- [WIN91] Winje, D.; Witt, D.: Energiewirtschaft. Berlin [u.a.]: Springer, 1991.
- [WIT93] Wittmann, W.; Kern, W.: Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre, Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, Band 2. 5. Aufl., Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993.
- [WOR04] Worldwatch Institute (Hrsg.): Zur Lage der Welt 2004. Die Welt des Konsums. Münster: Westfälisches Dampfboot, 2004.

- [YAN94] Yantovskii, E.I.: Energy and Exergy currents: An Introduction to Exergonomics. New York: Nova Science, 1994.
- [ZAB01] Zabel, H.-U.: Ökologische Unternehmenspolitik im Verhaltenskontext. Verhaltensmodellierung für Sustainability. Berlin: Berlin-Verl. Spitz, 2001.
- [ZHE02] Zheng, D.; Wu, X.: A Modified Environment-Reference-State Model of Exergy Functions. In: Proceedings of ECOS 2002, 1401-1408.
- [ZIM98] Zimmermann, W.; Fries, H.-P.: Betriebliches Rechnungswesen. 7.Aufl., München: Oldenbourg, 1998.

VERZEICHNIS DER ANHÄNGE

Anhang 1: Definition von Zuständen	176
Anhang 2: Berechnung der Exergie für feuchte Luft und Brenngase.....	177
Anhang 3: Berechnung der Exergie für Wasser	180
Anhang 4: Berechnung der Exergie für den Einsatzstoff „Spuckstoffe“	181
Anhang 5: Berechnung der Exergie für Asche	184
Anhang 6: Berechnung der Exergie für den Einsatzstoff „Altreifen“	185
Anhang 7: Berechnung der Exergie für Pyrolyseöl.....	188
Anhang 8: Berechnung der Exergie für feste Pyrolyseprodukte.....	189
Anhang 9: Fließschema für die Verwertung von Abfallstoffen der Papierindustrie	190
Anhang 10: Kennzahlen für die Verwertung von Abfallstoffen der Papierindustrie.....	191
Anhang 10-1: Kennzahlen der Gesamtsystemebene ohne Transitbereinigung	191
Anhang 10-2: Kennzahlen der Gesamtsystemebene bei anteilsorientiertem Transit	192
Anhang 10-3: Kennzahlen der Gesamtsystemebene bei wandlungsorientiertem Transit.....	193
Anhang 10-4: Exergoökonomische Kennzahlen, Exergiepreis 0,00 EUR/kWh	194
Anhang 10-5: Exergoökonomische Kennzahlen, Exergiepreis 0,02 EUR/kWh	194
Anhang 10-6: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 1.....	195
Anhang 10-7: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 2.....	195
Anhang 10-8: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 3.....	196
Anhang 10-9: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 4.....	196
Anhang 10-10: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 5	197
Anhang 11: Fließschema für die Altreifenpyrolyse.....	198
Anhang 12: Kennzahlen für die Altreifenpyrolyse	199
Anhang 12-1: Kennzahlen der Gesamtsystemebene.....	199
Anhang 12-2: Exergoökonomische Kennzahlen, Exergiepreis 0,00 EUR/kWh	200
Anhang 12-3: Exergoökonomische Kennzahlen, Exergiepreis 0,02 EUR/kWh	200
Anhang 12-4: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 1.....	201
Anhang 12-5: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 2.....	201
Anhang 12-6: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 3.....	202
Anhang 12-7: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 4.....	202
Anhang 12-8: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 5.....	203

Anhang 1: Definition von Zuständen

- Datei: Daten_Standard.mcd
- Standardzustand: Referenzzustand zur Berechnung der Enthalpie und Entropie:
$$p_0 = 101,325\text{kPa}; T_0 = 273,15\text{K}$$
- Bezugszustand: Referenzzustand zur Bestimmung der Standardbildungsenthalpie und Standardbildungsentropie:
$$p_B = 101,325\text{kPa}; T_B = 298,15\text{K}$$
- Umgebungszustand: Referenzzustand zur Berechnung der Exergie:
$$p_U = 101,325\text{kPa}; T_U = 293,15\text{K}$$

Anhang 2: Berechnung der Exergie für feuchte Luft und Brenngase

- Datei: Daten_FLuft.mcd
- betrachtete Komponenten: Sauerstoff (O₂), Stickstoff (N₂), Kohlendioxid (CO₂), Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoff (H₂), Methan (CH₄), Ethen (C₂H₄) und Wasser (H₂O)
- Stoffdaten [ATK01, BAE96, FRA93]:

Komponente	spez. Bildungs-enthalpie [kJ/mol]	spez. Bildungs-entropie [J/mol K]	Molare Masse [kg/kmol]
O ₂	0	204,83	32
N ₂	0	209,74	44
CO ₂	-393,1	213,78	28
CO	-110,4	198,04	2
H ₂	0	130,66	16
CH ₄	-74,78	186,3	64
C ₂ H ₄	52,29	219,58	28
H ₂ O(l)	-285,5	69,9	18
H ₂ O(v)	-241,6	188,8	18

Berechnung der Enthalpie der Luft bzw. des Brenngases:

- thermische Enthalpie der trockenen Gasbestandteile über c_p-Ansatz

$$h_{iG}^{TH}(T, \xi) = \sum_{i=1}^{10} \xi_i \int_{T_0}^T c_{pi} dT \quad (5.1)$$

- thermische Enthalpie des Wassers und des Wasserdampfes unter Nutzung der Wasserdampftafel des Mathcad-Programmes
- chemische Enthalpie mit den angegebenen Bildungsenthalpien der Komponenten bezogen auf den Standardzustand

$$h^{CH}(\xi) = \sum_{i=1}^{10} (\xi_i H_{B0i}) - h^{TH}(T_B, \xi) \quad (5.2)$$

- Vernachlässigung von Mischungseffekten und des Druckeinflusses

$$h_G(p, T, \xi) = h_{tG}^{TH}(T, \xi) + h_{H_2O}^{TH}(p, T, \xi) + h^{CH}(\xi) \quad (5.3)$$

Berechnung der Entropie der Luft bzw. des Brenngases:

- thermische, mechanische und Konzentrationsentropie der trockenen Gasbestandteile
- thermische, mechanische und Konzentrationsentropie des Wassers und des Wasserdampfes unter Nutzung der Wasserdampf tabel des Mathcad-Programmes
- chemische Entropie mit den angegebenen Bildungsentropien der Komponenten

$$s_G(p, T, \xi) = s_{tG}^{TH} + s_{tG}^{ME} + s_{tG}^{CO} + s_{H_2O}^{TH} + s_{H_2O}^{ME} + s_{H_2O}^{CO} + s^{CH} \quad (5.4)$$

Berechnung des Umgebungszustandes

- Zusammensetzung der Umgebungsluft (in Massenanteilen): Sauerstoff O_2 (0,2295), Stickstoff N_2 (0,7556), Kohlendioxid CO_2 (0,0004) und Wasser H_2O (0,0145)
- Berechnung der spezifisch entstehenden Umgebungsstoffe bei chemischen Umsatz der Brenngaskomponenten

$$\xi_{U,O_2} = \left(\frac{\xi_{O_2}}{M_{O_2}} - \frac{\xi_{CO}}{2M_{CO}} - \frac{\xi_{H_2}}{2M_{H_2}} - \frac{2\xi_{CH_4}}{M_{CH_4}} - \frac{3\xi_{C_2H_4}}{M_{C_2H_4}} \right) M_{O_2} \quad (5.5)$$

$$\xi_{U,N_2} = \xi_{N_2} \quad (5.6)$$

$$\xi_{U,CO_2} = \left(\frac{\xi_{CO}}{M_{CO}} + \frac{\xi_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{\xi_{CH_4}}{M_{CH_4}} + \frac{2\xi_{C_2H_4}}{M_{C_2H_4}} \right) M_{CO_2} \quad (5.7)$$

$$\xi_{U,H_2O} = \left(\frac{\xi_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{\xi_{H_2}}{M_{H_2}} + \frac{2\xi_{CH_4}}{M_{CH_4}} + \frac{2\xi_{C_2H_4}}{M_{C_2H_4}} \right) M_{H_2O} \quad (5.8)$$

- Berechnung von Enthalpie und Entropie der entstehenden Umgebungsstoffe

$$h_U = h_G(p_U, T_U, \xi_U) \quad (5.9)$$

$$s_U = s_G(p_U, T_U, \xi_U) \quad (5.10)$$

Exergiefunktion

$$e_G(p, T, \xi) = h_G(p, T, \xi) - h_U - T_U(s_G(p, T, \xi) - s_U) \quad (5.11)$$

Beispiel: Pyrolysegas ($p = p_U$, $T = 373,15\text{K}$)

Komponente	O ₂	N ₂	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	H ₂ O
Zusammensetzung Brenngas [kg/kg(Brenngas)]	0	0,0013	0,2571	0,0545	0,0096	0,2276	0,3983	0,0396
entstehende Umgebungsstoffe [kg/kg(Brenngas)]	-2,3835	0,0013	2,2204	0	0	0	0	1,1498

Zustandsgröße	h^{TH} [kJ/kg]	h^{CH} [kJ/kg]	s^{TH} [kJ/kgK]	s^{ME} [kJ/kgK]	s^{CO} [kJ/kgK]	s^{CH} [kJ/kgK]	e [kJ/kg]
Brenngas	185,69	-3541,74	0,59	0	0,56	7,92	32619,95
Umgebungsstoffe	142,45	-38258,5	0,80	0	1,97	-1,01	0

Anhang 3: Berechnung der Exergie für Wasser

- Datei: Daten_Wasser.mcd
- Verwendung der Wasserdampf tabel des Mathcad-Programms
- Stoffdaten [BAE96]: molare Standardbildungsenthalpie -285,5 kJ/mol sowie molare Standardbildungsentropie 69,9J/molK
- Wasser ist Umgebungsstoff, daher keine Berechnung von entstehenden Umgebungsstoffen notwendig

Exergiefunktion

$$e_W(T, p) = h_W(T, p) - h_W(T_U, p_U) - T_U(s_W(T, p) - s_W(T_U, p_U)) \quad (5.12)$$

Anhang 4: Berechnung der Exergie für den Einsatzstoff „Spuckstoffe“

- Datei: Daten_SpStoff.mcd
- betrachtete Komponenten des Abfallstoffes: Holz, bestehend aus Cellulose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) und Lignin $C_{10}H_8$ sowie Inerte, Polyethylen ($n(CH_2)$) und Wasser (H_2O)
- Stoffdaten [ATK01, BAE96, FRA93]:

Komponente	molare Bildungs-enthalpie [kJ/mol]	molare Bildungs-entropie [J/mol K]	Molare Masse [kg/kmol]
$C_{12}H_{22}O_{11}$	-2223,8	360,48	342
$C_{10}H_8$	78,5	167,47	128
$n(CH_2)$	-20	40	14
$H_2O(l)$	-285,5	69,9	18

Berechnung der Enthalpie der Spuckstoffe

- physikalische Enthalpie der trockenen Bestandteile über c_p -Ansatz

$$h_t^{PH}(T, \xi) = \sum_{i=1}^4 \xi_i \int_{T_0}^T c_{pi} dT \quad (5.13)$$

- physikalische Enthalpie des Wassers und des Wasserdampfes unter Nutzung der Wasserdampf-tafel des Mathcad-Programmes
- chemische Enthalpie mit den angegebenen Bildungsenthalpien der Komponenten bezogen auf den Standardzustand

$$h^{CH}(\xi) = \sum_{i=1}^5 (\xi_i H_{B0i}) - h^{PH}(T_B, \xi) \quad (5.14)$$

- Vernachlässigung von Mischungseffekten

$$h_S(T, \xi) = h_t^{PH}(T, \xi) + h_{H_2O}^{PH}(T, \xi) + h^{CH}(\xi) \quad (5.15)$$

Berechnung der Entropie der der Spuckstoffe:

- physikalische Entropie der trockenen Bestandteile
- physikalische Entropie des Wassers und des Wasserdampfes unter Nutzung der Wasserdampf- und Wasserdrucktafel des Mathcad-Programmes
- chemische Entropie mit den angegebenen Bildungsentropien der Komponenten
- Vernachlässigung von Mischungseffekten, da Feststoff

$$s_s(T, \xi) = s_t^{PH} + s_{H_2O}^{PH} + s^{CH} \quad (5.16)$$

Berechnung des Umgebungszustandes

- Bestimmung der Elementarmassenanteile im Abfallstoff
- Berechnung der spezifisch entstehenden Umgebungsstoffe bei chemischem Umsatz der Abfallstoffkomponenten

$$\xi_{U,O_2} = \left(\frac{\xi_{O_2}}{M_{O_2}} - \frac{\xi_C}{M_C} - \frac{\xi_{H_2}}{2M_{H_2}} \right) M_{O_2} \quad (5.17)$$

$$\xi_{U,CO_2} = \left(\frac{\xi_C}{M_C} \right) M_{CO_2} \quad (5.18)$$

$$\xi_{U,H_2O} = \left(\frac{\xi_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{\xi_{H_2}}{M_{H_2}} + \frac{2\xi_{CH_4}}{M_{CH_4}} + \frac{2\xi_{C_2H_4}}{M_{C_2H_4}} \right) M_{H_2O} \quad (5.19)$$

- Berechnung von Enthalpie und Entropie der entstehenden Umgebungsstoffe

$$h_U = h_G(p_U, T_U, \xi_U) \quad (5.20)$$

$$s_U = s_G(p_U, T_U, \xi_U) \quad (5.21)$$

Exergiefunktion

$$e_s(T, \xi) = h_s(T, \xi) - h_U - T_U (s_s(T, \xi) - s_U) \quad (5.22)$$

Beispiel: Spuckstoff ($T = T_U$)

Komponente	$C_{12}H_{22}O_{11}$	$C_{10}H_8$	Inerte	$n(CH_2)$	H_2O	O_2	CO_2
Abfallstoff [kg/kg(Abfallstoff)]	0,35	0,1	0,1	0,05	0,4	0,4	0,4
entstehende Umgebungsstoffe [kg/kg(Abfallstoff)]	0	0	0,1	0	0,723	-0,86	1,04

Zustandsgröße	h^{PH} [kJ/kg]	h^{CH} [kJ/kg]	s^{PH} [kJ/kgK]	s^{CO} [kJ/kgK]	s^{CH} [kJ/kgK]	e [kJ/kg]
Abfallstoff	54,18	-8698,06	0,19	0	1,96	12347,07
Umgebungsstoffe	62,17	-20850,51	0,22	1,25	1,38	0

Anhang 5: Berechnung der Exergie für Asche

- Datei: Daten_Asche.mcd
- betrachtete Komponenten des Rückstandes der Vergasung: Kohlenstoff (C), Inerte (I) und Wasser (H₂O)
- Berechnung der Enthalpie und Entropie in Analogie zum Einsatzstoff „Spuckstoffe“
- Berechnung der spezifisch entstehenden Umgebungsstoffe CO₂, Inerte und H₂O

$$\xi_{U,CO_2} = -\frac{\xi_C}{M_C} M_{CO_2} \quad (5.23)$$

$$\xi_{U,I} = \xi_I \quad (5.24)$$

$$\xi_{U,H_2O} = \xi_{H_2O} \quad (5.25)$$

- Berechnung von Enthalpie und Entropie der entstehenden Umgebungsstoffe

Exergiefunktion

$$e_A(T, \xi) = h_A(T, \xi) - h_U - T_U(s_A(T, \xi) - s_U) \quad (5.26)$$

Anhang 6: Berechnung der Exergie für den Einsatzstoff „Altreifen“

- Datei: Daten_Einsatzstoffe.mcd
- betrachtete Komponenten: Gummi, Ruß und Stahl
- Stoffdaten [BAE96, VDI02]:

Komponente	Wärmekapazität [kJ/kg K]	spez. Bildungsenthalpie [kJ/kg]	spez. Bildungsentropie [J/kg K]
Gummi	1,62	-	2,94
Ruß	0,71	0	0,46
Stahl	0,47	0	0,49

- Elementaranalyse (in Massenanteilen): flüchtiger Kohlenstoff (C) 0,446, Wasserstoff (H₂) 0,063, Sauerstoff (O₂) 0,022, Schwefel (S) 0,01, Stickstoff (N₂) 0,005 sowie Ruß (C) 0,294 und Stahl (Fe) 0,16.

Berechnung des Umgebungszustandes

- Berechnung der entstehenden Umgebungsstoffe (Komponenten der Umgebungsluft, Gips und Eisenoxid):

$$\xi_{U,O_2} = \left(\frac{\xi_{O_2}}{M_{O_2}} - \frac{\xi_{Cfl} + \xi_{RuB}}{M_C} - \frac{0,75\xi_{Fe}}{M_{Fe}} - \frac{1,5\xi_S}{M_S} \right) M_{O_2} \quad (5.27)$$

$$\xi_{U,N_2} = \xi_{N_2} \quad (5.28)$$

$$\xi_{U,CO_2} = \left(\frac{\xi_{Cfl} + \xi_{RuB}}{M_C} + \frac{\xi_S}{M_S} \right) M_{CO_2} \quad (5.29)$$

$$\xi_{U,H_2O} = \left(\frac{\xi_{H_2}}{M_{H_2}} - \frac{2 * \xi_S}{M_S} \right) M_{H_2O} \quad (5.30)$$

$$\xi_{U,CaCO_3} = - \left(\frac{\xi_S}{M_S} \right) M_{CaCO_3} \quad (5.31)$$

$$\xi_{U, CaSO_4 \cdot 2H_2O} = \left(\frac{\xi_S}{M_S} \right) M_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} \quad (5.32)$$

$$\xi_{U, Fe_2O_3} = \left(\frac{\xi_{Fe}}{2M_{Fe}} \right) M_{Fe_2O_3} \quad (5.33)$$

- Berechnung von Enthalpie und Entropie der entstehenden Umgebungsstoffe

$$h_U^{PH} = \sum_{i=1}^4 \xi_{U,i} \int_{T_0}^{T_U} c_{pi} dT + \sum_{i=5}^8 \xi_{U,i} c_{pi} (T_U - T_0) \quad (5.34)$$

$$h_U = h_U^{PH} + h_U^{CH} \quad (5.35)$$

$$s_U^{PH} = \sum_{i=1}^4 \xi_{U,i} \left[\int_{T_0}^{T_U} \frac{c_{pi}}{T} dT - R \ln(x_i) \right] + \sum_{i=5}^8 \xi_{U,i} \left[c_{pi} \ln \left(\frac{T_U}{T_0} \right) \right] \quad (5.36)$$

$$s_U = s_U^{PH} + s_U^{CH} \quad (5.37)$$

Berechnung der Enthalpie und der Entropie der Altreifen

- physikalische Enthalpie über c_p -Ansatz

$$h^{PH}(T, \xi) = \sum_{i=1}^3 \xi_i c_{pi} (T - T_0) \quad (5.38)$$

- chemische Enthalpie mit Hilfe der Verbandsformel für die Gummikomponenten und den Ruß sowie mit der Bildungsenthalpie für Stahl

$$h^{CH}(\xi) = (34,8c + 93,9h - 10,8o + 10,5s + 6,3n) \frac{MJ}{kg} + w \Delta h_{LV} \quad (5.39)$$

$$+ h_{Fe}^{CH} + h_U^{CH} - h^{PH}(T_B, \xi)$$

$$h_R(T, \xi) = h^{PH}(T, \xi) + h^{CH}(\xi) \quad (5.40)$$

- physikalische Entropie über c_p -Ansatz

$$s^{PH}(T, \xi) = \sum_{i=1}^3 \xi_i c_{pi} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (5.41)$$

- chemische Entropie mit Hilfe der Bildungsentropien der Komponenten

$$s^{CH}(\xi) = \sum_{i=1}^3 \xi_i S_{B0i} \quad (5.42)$$

- Vernachlässigung von Mischungs- und Druckeffekten

$$s_R(T, \xi) = s^{PH}(T, \xi) + s^{CH}(\xi) \quad (5.43)$$

Exergiefunktion

$$e_R(T, \xi) = h_R(T, \xi) - h_U - T_U (s_R(T, \xi) - s_U) \quad (5.44)$$

Beispiel: Altreifen ($T = T_U$)

Komponente	O ₂	N ₂	CO ₂	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	CaSO ₄ 2H ₂ O	H ₂ O
entstehende Umgebungsstoffe [kg/kg(Brenngas)]	-2,533	0,005	2,725	0,229	-0,031	0,054	0,522

Zustandsgröße	h ^{PH} [kJ/kg]	h ^{CH} [kJ/kg]	s ^{PH} [kJ/kgK]	s ^{CO} [kJ/kgK]	s ^{CH} [kJ/kgK]	e [kJ/kg]
Altreifen	23,37	-604,19	0,08	0	1,72	34325,54
Umgebungsstoffe	48,54	-34667,83	0,17	3,15	-0,54	0

Anhang 7: Berechnung der Exergie für Pyrolyseöl

- Datei: Daten_Pyrolyseoel.mcd
- Berechnung erfolgt analog der Altreifenberechnung
- Grundlage: Elementaranalyse (in Massenanteilen): flüchtiger Kohlenstoff (C) 0,856, , Wasserstoff (H₂) 0,1135, Schwefel (S) 0,022 und Stickstoff (N) 0,0085
- Stoffdaten Pyrolyseöl: spezifische Wärmekapazität je nach Aggregatzustand $c_p=2$ kJ/kgK (flüssig) bzw. $c_p=1,65$ kJ/kgK (gasförmig), spezifische Bildungsentropie $S_{B0}=2,941$ kJ/kgK, spezifische Verdampfungsenthalpie $H_{LV}=345$ kJ/kg

Exergiefunktion

$$e_o(T, \xi) = h_o(T, \xi) - h_u - T_u (s_o(T, \xi) - s_u) \quad (5.45)$$

Beispiel: Pyrolyseöl (T = 373,15K)

Komponente	O ₂	N ₂	CO ₂	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	CaSO ₄ 2H ₂ O	H ₂ O
entstehende Umgebungsstoffe [kg/kg(Brenngas)]	-3,214	0,0085	3,167	0	-0,069	0,118	0,99

Zustandsgröße	h^{PH} [kJ/kg]	h^{CH} [kJ/kg]	s^{PH} [kJ/kgK]	s^{CO} [kJ/kgK]	s^{CH} [kJ/kgK]	e [kJ/kg]
Pyrolyseöl	200	-1669,15	0,62	0	2,76	42915,41
Umgebungsstoffe	77,58	-44766,64	0,27	3,55	-1,47	0

Anhang 8: Berechnung der Exergie für feste Pyrolyseprodukte

- Datei: Daten_FesteProdukte.mcd
- betrachtete Komponenten: nichtpyrolysierter Kordanteil, Ruß und Stahl
- Stoffdaten Kord [BAE86, VDI02]: Verwendung der Daten für Lignin, da Strukturformel ähnlich: spezifische Wärmekapazität $c_p=1,62$ kJ/kgK, spezifische Bildungsenthalpie $H_{B0}=3173$ kJ/kg, spezifische Bildungsentropie $S_{B0}=1,471$ kJ/kgK
- Elementaranalyse (in Massenanteilen): flüchtiger Kohlenstoff (C) 0,0088, Wasserstoff (H₂) 0,0008, Sauerstoff (O₂) 0,0034 sowie Ruß (C) 0,6391 und Stahl (Fe) 0,3478.
- Berechnung erfolgt analog Altreifen

Exergiefunktion

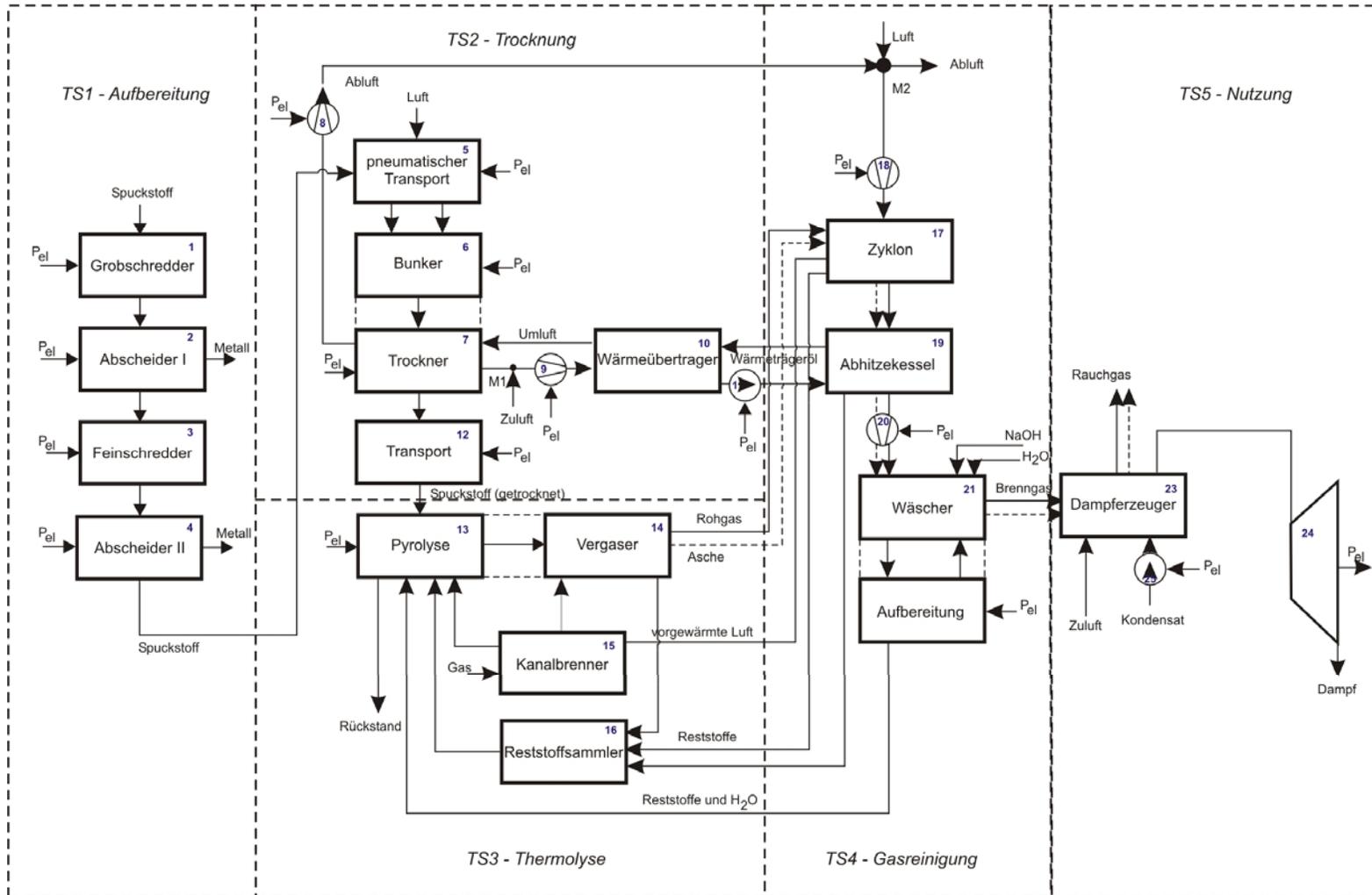
$$e_p(T, \xi) = h_p(T, \xi) - h_U - T_U (s_p(T, \xi) - s_U) \quad (5.46)$$

Beispiel: feste Pyrolyseprodukte (T = 373,15K)

Komponente	O ₂	N ₂	CO ₂	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	CaSO ₄ 2H ₂ O	H ₂ O
entstehende Umgebungsstoffe [kg/kg(Brenngas)]	-1,879	0	2,374	0,497	0	0	0,008

Zustandsgröße	h^{PH} [kJ/kg]	h^{CH} [kJ/kg]	s^{PH} [kJ/kgK]	s^{CO} [kJ/kgK]	s^{CH} [kJ/kgK]	e [kJ/kg]
Feste Pyrolyseprodukte	63,84	-57,34	0,20	0	0,42	24603,29
Umgebungsstoffe	12,10	-23922,60	0,04	2,877	0,05	0

Anhang 9: Fließschema für die Verwertung von Abfallstoffen der Papierindustrie



Anhang 10: Kennzahlen für die Verwertung von Abfallstoffen der Papierindustrie

Anhang 10-1: Kennzahlen der Gesamtsystemebene ohne Transitbereinigung

Teilsystem	ε	ε_D	ε_L	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I	λ_K^H
SS01 - Aufbereitung	0,0054	0,0054	0,0000	0,9972	0,0054	0,2986	0,2868	0,0856	0,0011	0,0342	0,0503
SS02 - Trocknung	0,0032	0,0029	0,0003	12,5213	0,0406	0,0410	2,6391	0,1081	0,0082	0,0596	0,0404
SS03 - Vergasung	0,2223	0,2119	0,0104	1,0154	0,2258	0,5295	0,3404	0,1802	0,0458	0,0887	0,0457
SS04 - Gasreinigung	0,0054	0,0052	0,0002	12,2916	0,0659	0,0552	2,6238	0,1448	0,0134	0,0862	0,0453
SS05 - Nutzung	0,4266	0,3697	0,0569	0,6910	0,2947	0,7630	0,3374	0,2574	0,0595	0,1299	0,0680
Gemeinkostenbeitrag										0,0380	0,1126
TS - Gesamtsystem	0,6324	0,5763	0,0561			0,9261					

Anhang 10-2: Kennzahlen der Gesamtsystemebene bei anteilsorientiertem Transit

Teilsystem	ε	ε_D	ε_L	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I	λ_K^H
SS01 - Aufbereitung	0,1549	0,1549	0,0000	0,0350	0,0054	0,9351	0,0916	0,0856	0,0011	0,0342	0,0503
SS02 - Trocknung	0,2397	0,2153	0,0244	0,1706	0,0409	0,8057	0,1342	0,1081	0,0082	0,0596	0,0404
SS03 - Vergasung	0,2223	0,2119	0,0104	1,0238	0,2276	0,5295	0,3404	0,1802	0,0458	0,0887	0,0457
SS04 - Gasreinigung	0,1431	0,1385	0,0046	0,4646	0,0665	0,6447	0,2246	0,1448	0,0133	0,0862	0,0453
SS05 - Nutzung	0,4266	0,3697	0,0569	0,6967	0,2972	0,7629	0,3374	0,2574	0,0595	0,1299	0,0680
Gemeinkostenbeitrag										0,0380	0,1126
TS - Gesamtsystem	0,6376	0,5811	0,0566			0,9271					

Anhang 10-3: Kennzahlen der Gesamtsystemebene bei wandlungsorientiertem Transit

Teilsystem	ε	ε_D	ε_L	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I	λ_K^H
SS01 - Aufbereitung	1,0000	1,0000	0,0000	0,0054	0,0054	1,0000	0,0856	0,0856	0,0011	0,0342	0,0503
SS02 - Trocknung	0,9686	0,8701	0,0985	0,0422	0,0409	0,9975	0,1084	0,1081	0,0082	0,0596	0,0404
SS03 - Vergasung	0,2223	0,2119	0,0104	1,0238	0,2276	0,5293	0,3405	0,1803	0,0458	0,0887	0,0457
SS04 - Gasreinigung	0,5461	0,5286	0,0175	0,1218	0,0665	0,9288	0,1559	0,1448	0,0133	0,0862	0,0453
SS05 - Nutzung	0,4317	0,3741	0,0576	0,6884	0,2972	0,7650	0,3375	0,2582	0,0603	0,1299	0,0680
Gemeinkostenbeitrag										0,0380	0,1126
TS - Gesamtsystem	0,6376	0,5811	0,0566			0,9271					

Anhang 10-4: Exergoökonomische Kennzahlen, Exergiepreis 0,00 EUR/kWh

Teilsystem	ϵ_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I	λ_K^H
SS01 - Aufbereitung	1,0000	0,1058	0,1058	0,0000	0,0428	0,0630
SS02 - Trocknung	1,0000	0,1251	0,1251	0,0000	0,0745	0,0505
SS03 - Vergasung	1,0000	0,1683	0,1683	0,0000	0,1110	0,0573
SS04 - Gasreinigung	1,0000	0,1645	0,1645	0,0000	0,1079	0,0567
SS05 - Nutzung	1,0000	0,2477	0,2477	0,0000	0,1626	0,0852
Gemeinkostenbeitrag					0,0476	0,1410
TS - Gesamtsystem	1,0000					

Anhang 10-5: Exergoökonomische Kennzahlen, Exergiepreis 0,02 EUR/kWh

Teilsystem	ϵ_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I	λ_K^H
SS01 - Aufbereitung	1,0000	0,0722	0,0722	0,0018	0,0285	0,0419
SS02 - Trocknung	0,9955	0,0973	0,0968	0,0136	0,0496	0,0336
SS03 - Vergasung	0,4136	0,4551	0,1882	0,0763	0,0738	0,0381
SS04 - Gasreinigung	0,8770	0,1501	0,1316	0,0222	0,0717	0,0377
SS05 - Nutzung	0,6675	0,3972	0,2651	0,1003	0,1081	0,0566
Gemeinkostenbeitrag					0,0316	0,0938
TS - Gesamtsystem	0,8786					

Anhang 10-6: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 1

Apparat des SS01	ε	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I
Grobschredder	1,0000	0,4032	0,4032	1,0000	0,1336	0,1336	0,0563	0,0774
Abscheider I	0,9996	0,0296	0,0296	1,0000	0,0364	0,0364	0,0041	0,0322
Feinschredder	1,0000	0,5376	0,5376	1,0000	0,1524	0,1524	0,0750	0,0774
Abscheider II	0,9996	0,0296	0,0296	1,0000	0,0364	0,0364	0,0041	0,0322
Gemeinkostenbeitrag						0,6412		
SS01 – Teilsystem	1,0000			1,0000				

Anhang 10-7: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 2

Apparat des SS02	ε	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I
Transport	0,9914	0,0276	0,0274	0,9959	0,0255	0,0254	0,0122	0,0132
Trockner	0,9115	0,5144	0,4688	0,9294	0,3908	0,3632	0,2840	0,0792
Mischung	0,6709	0,0351	0,0235	0,7016	0,0283	0,0199	0,0172	0,0026
Abluft-Lüfter	0,9353	0,0345	0,0323	0,9652	0,0285	0,0276	0,0144	0,0132
Umluft-Lüfter	0,7392	0,1208	0,0893	0,7906	0,0669	0,0529	0,0397	0,0132
WÜ	0,3694	0,7784	0,2876	0,4168	0,5267	0,2195	0,1799	0,0396
Ölpumpe	1,0000	0,0345	0,0345	1,0000	0,0365	0,0365	0,0154	0,0211
Förderband	1,0000	0,0052	0,0052	1,0000	0,0155	0,0155	0,0023	0,0132
Gemeinkostenbeitrag						0,2209		
SS02 – Teilsystem	0,9686			0,9813				

Anhang 10-8: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 3

Apparat des SS03	ε	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I
Reaktor	0,2208	1,0037	0,2216	0,2783	0,8924	0,2484	0,1825	0,0659
Kanalbrenner	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0082	0,0082	0,0000	0,0082
Reststoffsammler	0,9980	0,0007	0,0007	0,9997	0,0189	0,0189	0,0024	0,0165
Gemeinkostenbeitrag						0,0842		
SS03 – Teilsystem	0,2223			0,3596				

Anhang 10-9: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 4

Apparat des SS04	ε	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I
Mischung	0,5298	0,0188	0,0100	0,5321	0,3277	0,1744	0,1728	0,0016
Zyklon	0,4504	0,3035	0,1367	0,6294	0,1231	0,0775	0,0374	0,0401
Zuluft-Lüfter	0,9739	0,0060	0,0058	0,9904	0,0127	0,0126	0,0045	0,0080
Abhitzekessel	0,3917	0,4518	0,1770	0,5314	0,1746	0,0928	0,0527	0,0401
Saugzug	0,7076	0,0778	0,0551	0,7907	0,0847	0,0670	0,0429	0,0241
Wäscher	0,9134	0,1768	0,1615	0,9526	0,1063	0,1012	0,0531	0,0481
Gemeinkostenbeitrag						0,1708		
SS04 – Teilsystem	0,5461			0,6962				

Anhang 10-10: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 5

Apparat des SS05	ε	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I
Dampferzeuger	0,3976	1,0011	0,3980	0,4459	0,8443	0,3765	0,3088	0,0677
Turbine	0,1450	0,2046	0,0297	0,3213	0,1971	0,0633	0,0227	0,0406
Pumpe	0,6275	0,0064	0,0040	0,7105	0,0152	0,0108	0,0074	0,0034
Gemeinkostenbeitrag						0,0998		
SS05 – Teilsystem	0,4317			0,5505				

Anhang 12: Kennzahlen für die Altreifenpyrolyse

Anhang 12-1: Kennzahlen der Gesamtsystemebene

Teilsystem	ε	ε_D	ε_L	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I	λ_K^H
Aufbereitung	1,0000	1,0000	0,0000	0,0005	0,0005	1,0000	0,0978	0,0978	0,0002	0,0214	0,0762
Thermische Strecke	0,0312	0,0249	0,0063	1,0284	0,0321	0,1055	0,5302	0,0664	0,0149	0,0412	0,0103
Rohgasbehandlung	0,4967	0,4504	0,0463	0,0033	0,0017	0,9430	0,0191	0,0183	0,0008	0,0140	0,0035
Energieerzeugung	0,5122	0,4827	0,0296	0,0992	0,0508	0,6318	0,0721	0,0496	0,0236	0,0208	0,0052
Feststoffstrecke	1,0000	1,0000	0,0000	0,0007	0,0007	1,0000	0,0737	0,0737	0,0003	0,0020	0,0714
Gemeinkostenbeitrag										0,0624	0,2046
Gesamtsystem	0,0858	0,0763	0,0095			0,5730					

Anhang 12-2: Exergoökonomische Kennzahlen, Exergiepreis 0,00 EUR/kWh

Teilsystem	ϵ_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I	λ_K^H
Aufbereitung	1,0000	0,1831	0,1831	0,0000	0,0401	0,1430
Thermische Strecke	0,3167	0,0966	0,0966	0,0000	0,0773	0,0193
Rohgasbehandlung	0,9839	0,0329	0,0329	0,0000	0,0264	0,0066
Energieerzeugung	0,7542	0,0488	0,0488	0,0000	0,0390	0,0098
Feststoffstrecke	1,0000	0,1376	0,1376	0,0000	0,0037	0,1339
Gemeinkostenbeitrag					0,1171	0,3839
Gesamtsystem	1,0000					

Anhang 12-3: Exergoökonomische Kennzahlen, Exergiepreis 0,02 EUR/kWh

Teilsystem	ϵ_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^I	λ_K^H
Aufbereitung	1,0000	0,0669	0,0669	0,0003	0,0146	0,0520
Thermische Strecke	0,0740	0,6883	0,0555	0,0204	0,0281	0,0070
Rohgasbehandlung	0,9085	0,0141	0,0130	0,0010	0,0096	0,0024
Energieerzeugung	0,5923	0,0797	0,0495	0,0317	0,0142	0,0035
Feststoffstrecke	1,0000	0,0505	0,0505	0,0005	0,0013	0,0487
Gemeinkostenbeitrag					0,0426	0,1396
Gesamtsystem	0,4182					

Anhang 12-4: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 1

Apparat des SS01	ε	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^{I+H}
Fördertechnik	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,1991	0,1991	0,0104	0,1887
Waschanlage	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0697	0,0697	0,0000	0,0697
Filter	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0123	0,0123	0,0000	0,0123
Gemeinkostenbeitrag						0,7188		
SS01 – Teilsystem	1,0000			1,0000				

Anhang 12-5: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 2

Apparat des SS02	ε	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^{I+H}
Fördertechnik	1,0000	0,0003	0,0003	1,0000	0,0130	0,0130	0,0009	0,0120
Schlitzfräse	1,0000	0,0010	0,0010	1,0000	0,0088	0,0088	0,0031	0,0058
Abrollstrecke	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0014	0,0014	0,0000	0,0014
Trockner	0,8284	0,0076	0,0063	0,9053	0,0403	0,0365	0,0184	0,0181
Pyrolysereaktor	0,0228	0,9943	0,0226	0,0576	0,9416	0,0542	0,0207	0,0335
Abkühlzone	0,6766	0,0015	0,0010	0,7531	0,0076	0,0058	0,0039	0,0018
Schleuse	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0022	0,0022	0,0000	0,0022
Filter	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0018	0,0018	0,0000	0,0018
Gemeinkostenbeitrag						0,0000		
SS02 – Teilsystem	0,0312			0,1237				

Anhang 12-6: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 3

Apparat des SS03	ε	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^{I+H}
Kondensator 1	0,5437	0,3536	0,1922	0,9252	0,2444	0,2261	0,0218	0,2043
Kondensator 2	0,4218	0,5331	0,2248	0,8682	0,2647	0,2298	0,0254	0,2043
Kondensator 3	0,6857	0,1072	0,0735	0,9824	0,2165	0,2126	0,0083	0,2043
Pyrolyseöltank	1,0000	0,0061	0,0061	1,0000	0,2745	0,2745	0,0007	0,2738
Gemeinkostenbeitrag						0,0000		
SS03 – Teilsystem	0,4967			0,9430				

Anhang 12-7: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 4

Apparat des SS04	ε	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^{I+H}
Wärmeübertrager	0,5506	0,0182	0,0100	0,6955	0,0355	0,0247	0,0132	0,0114
Dampferzeuger	0,4769	0,0691	0,0330	0,6051	0,1555	0,0941	0,0560	0,0381
BHKW	0,5263	0,8916	0,4692	0,6336	0,7773	0,4925	0,3164	0,1761
Sammelbehälter	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0118	0,0118	0,0000	0,0118
Verteiler	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0076	0,0076	0,0000	0,0076
Gemeinkostenbeitrag						0,0000		
SS04 – Teilsystem	0,5122			0,6308				

Anhang 12-8: Exergoökonomische Kennzahlen des Teilsystems 5

Apparat des SS05	ε	κ	λ	ε_K	κ_K	λ_K	λ_K^{D+L}	λ_K^{I+H}
Phasentrenner	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0060	0,0060	0,0000	0,0060
Zwischenbehälter	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0054	0,0054	0,0000	0,0054
Rußabtrennung	1,0000	0,0001	0,0000	1,0000	0,0054	0,0054	0,0000	0,0054
Granulierung	1,0000	0,4285	0,4285	1,0000	0,0212	0,0212	0,0082	0,0130
Stahlpresse	1,0000	0,5714	0,5714	1,0000	0,0142	0,0142	0,0110	0,0032
Gemeinkostenbeitrag						0,9478		
SS05 – Teilsystem	1,0000			1,0000				

