

Zur systematischen Bewertung der Energieumwandlungen bei der thermischen Abfallbehandlung

– Was ist Energieeffizienz? –

Reinhard Scholz, Thorsten Harnaut, Michael Beckmann und Martin Horeni

1.	Allgemeines zu einem Wirkungsgrad η	204
2.	Anlagenwirkungsgrad η_a	207
3.	Nutzungsgrad (Nutzungswirkungsgrad) η_t	208
3.1.	Prinzip	208
3.2.	Beispiele	214
4.	Primärwirkungsgrade η_p	217
4.1.	Prinzip	217
4.2.	Beispiele	218
5.	Nettoprimärwirkungsgrade η_n	221
5.1.	Prinzip	221
5.2.	Beispiele	223
5.3.	Aufwandsgrad	227
6.	Stoffbilanzen (CO ₂ -Emissionen)	228
7.	Beurteilung verschiedener thermischer Verfahren	228
8.	Bewertung von Verfahren mit verschiedenen Behandlungsarten	229
9.	Einsatz von Abfall in anderen industriellen Hochtemperaturverfahren	229
9.1.	Brennstoffsubstitution, Energieaustauschverhältnis	229
9.2.	Bewertung von Ersatzbrennstoff aus Restmüll	230
10.	Bewertungsmaßstäbe des Energieeinsatzes bei reinen Stoffbehandlungsprozessen	231

11.	Bedeutung und Verwendung von Systemgrenzen	232
11.1.	Bildung von Wirkungsgraden	233
11.2.	Bildung von Kenngrößen und weiteren Kennzahlen	233
11.3.	Zeitliche Abhängigkeiten	234
11.4.	Berücksichtigung von Quellen und Senken	234
12.	Schrifttum	234

Die Abfallverbrennung dient zunächst dem Grundgedanken der thermischen Behandlung von Restabfall, damit verbleibende Stoffe – Gase, Asche usw. – gefahrlos in der Umgebung (gasförmig, fest) deponiert werden (Entsorgungsgedanke) und/oder teilweise verwertet werden können (Verwertungsgedanke). Hierzu sind vergleichsweise große verfahrenstechnische Aufwendungen erforderlich, die bekanntlich dazu führen, dass z.B. bei der Energiewandlung wesentlich weniger Nutzen anfällt als bei üblichen Kraftwerken. Teilweise wird bei thermischen Abfallbehandlungsanlagen auf energetische Gesichtspunkte wenig geachtet, so dass bei einigen thermischen Abfallbehandlungsverfahren der Energieinhalt des Restabfalls nicht ausreicht, um den Gesamtprozess zu betreiben. Dann sind zusätzlich noch Primärressourcen zum Prozessablauf erforderlich.

In der letzten Zeit wird auch bei der Abfallverbrennung verstärkt bei der Optimierung auf die energetische Effizienz der Verfahren geachtet. Deren Bewertung sollte auf seit langem bewährten und üblichen Methoden aus Energietechnik und Verfahrenstechnik beruhen [z.B. 10]. Dies soll im Folgenden verdeutlicht werden.

Kap. 1.

Allgemeines zu einem Wirkungsgrad η

Bei der Verbrennung von Abfällen geht es u.a. um die effiziente Umwandlung des Energieinhaltes (Heizwert) des Abfalls in andere Energieformen wie Energieinhalt von Wasserdampf (Wasserdampfenthalpie), elektrischen Strom, usw. Zur Bewertung stehen als wichtigste Kennzahlen die verschiedenen Wirkungsgrade zur Verfügung. Zunächst ist ein Wirkungsgrad η ganz allgemein das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}.$$

Bei der Diskussion, was Nutzen und was Aufwand ist, kommt es sehr häufig zu Missverständnissen, weil ganz verschiedene Systemgrenzen (Bilanzkreise, s.u.) betrachtet und damit verschiedene Werte angegeben werden können.

Zur Verdeutlichung dessen, was bewertet werden soll, ist es daher zunächst zwingend erforderlich, dass eine Systemgrenze (Bilanzgrenze) festgelegt wird, die den betrachteten Anlagenteil (Teilsystem), die gesamte Anlage (Anlagensystem) oder auch Primärenergieumwandlungsprozesse (Gesamtsystem) usw. einschließt. Damit ist festgelegt, was Gegenstand der Betrachtung ist. Als nächster Schritt müssen eine Massen- und Energiebilanz erstellt und geprüft werden, ob diese *aufgehen*, d.h., ob die Summe der eintretenden gleich der Summe der austretenden Ströme ist. Die Summe der eintretenden Ströme stellt den Aufwand dar.

Bild 1 zeigt das Vorgehen an einem Beispiel. Das thermische Hauptverfahren, z.B. bestehend aus Rostfeuerung (Systemgrenze A) und Kessel (Systemgrenze B), wird durch die Systemgrenze C (thermisches Hauptsystemverfahren) eingegrenzt. Durch das Hinzufügen der Abgasreinigung (Systemgrenze D) erhält man die betrachtete Anlage, die nun mit der Systemgrenze E dargestellt wird, die sie umschließt. Da im vorliegenden Bericht nicht zu weit detailliert werden kann, wird die Vernetzung der Systeme mit ihren Bilanzgrenzen A, B, C und D untereinander nicht betrachtet. Es soll mit der Bilanzierung des Systems E begonnen werden, das als Nutzen einen thermischen Energiestrom (Dampfstrom) erzeugt.

Es muss nicht nur ein einziger Nutzstrom den jeweils betrachteten Bilanzkreis verlassen. Wichtig ist, dass die Summe aller Nutzströme – kurz als *Nutzen* bezeichnet – sich vom Aufwand um die Summe aller Verlustströme – kurz als *Verlust* bezeichnet – unterscheidet.

Nutzen ist gleich Aufwand minus Verlust

Man kann daher den jeweiligen Wirkungsgrad wie folgt auch aus Verlusten und Aufwand berechnen

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Aufwand minus Verlust}}{\text{Aufwand}} = 1 - \frac{\text{Verlust}}{\text{Aufwand}} = 100 \% \text{ minus } \frac{\text{Verlust}}{\text{Aufwand}}.$$

Diese Gleichung ist zwar selbst trivial, jedoch nicht, wenn man sie anwenden will, weil die Verluste technisch *häufig schwer zu finden* sind. Bilanzen werden daher nicht selten geschlossen, indem man aus bekanntem Nutzen und Aufwand einfach die Verluste insgesamt als *Aufwand minus Nutzen* angibt. Dieser Weg ist zwar für die unmittelbare Bilanzierung formal gangbar; für eine Optimierung wird man jedoch nicht von der Aufgabe entbunden, Verluste zu identifizieren (zu suchen), zu analysieren und sie bei gleichem Aufwand zu verkleinern, um den jeweiligen Anlagenwirkungsgrad zu verbessern.

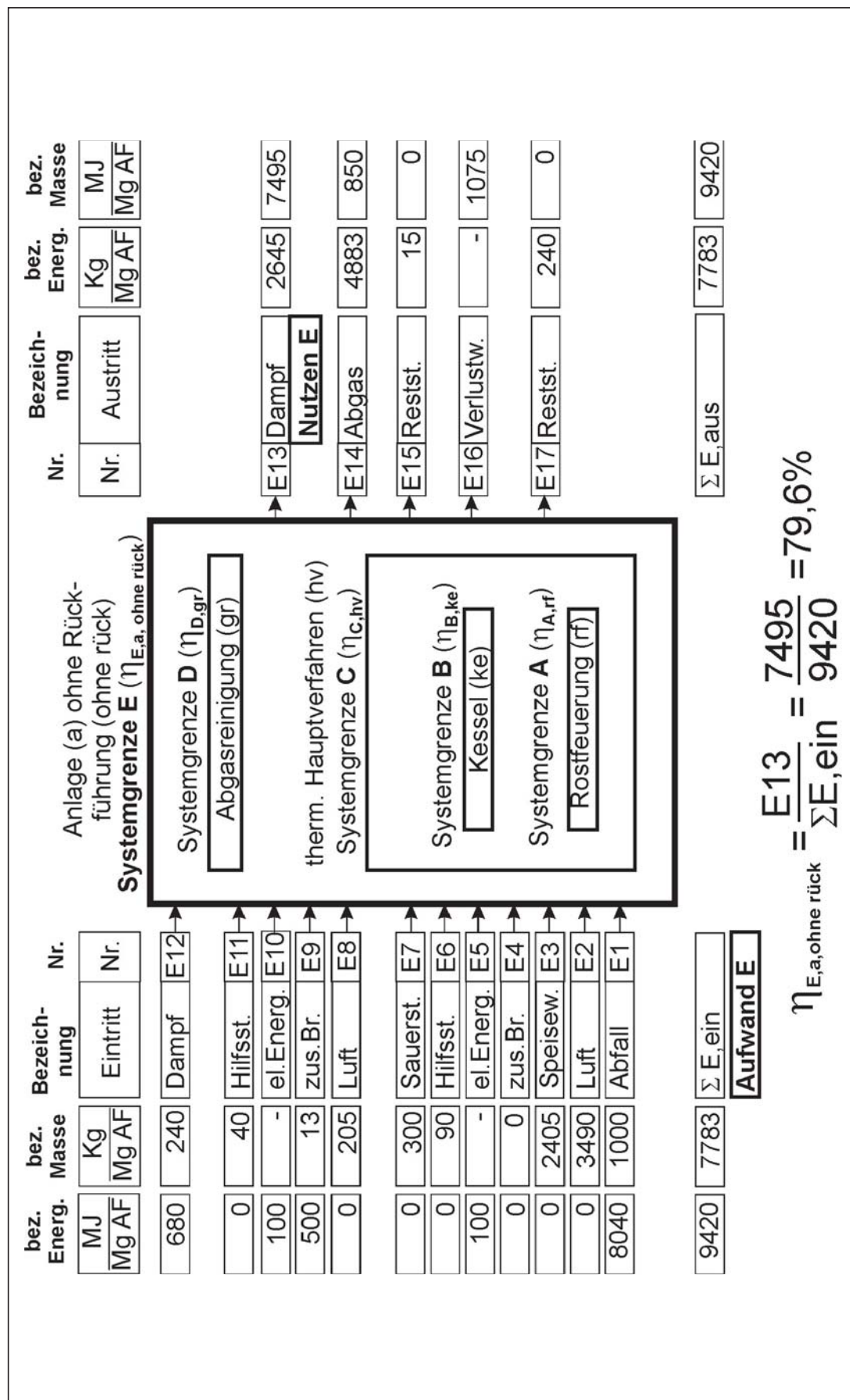


Bild 1: System zur Bildung des Anlagenwirkungsgrades η_a (ohne Rückführung)

Kap. 2.

Anlagenwirkungsgrad η_a

An der Systemgrenze E werden alle ein- und austretenden Ströme angetragen, nummeriert und die zugehörigen Werte für die Massen und Energien¹⁾ aufgeschrieben. Die Summe der eintretenden Ströme (Aufwand) muss, wie erwähnt, sowohl bei Massen- als auch Energiebilanzierung gleich der Summe der austretenden Ströme sein. Erst wenn, wie auch hier am Beispiel dargelegt, *die Bilanzen aufgehen*, kann als erste Kennzahl ein Wirkungsgrad an der Systemgrenze E (Index E) gebildet werden (η_E). Da es sich innerhalb der Bilanzgrenze E um eine Anlage handelt, wird zur Verdeutlichung der Index a für *Anlage* noch hinzugefügt ($\eta_{E,a}$), obwohl dies nicht notwendig wäre, da die Bezeichnung der Systemgrenze ausreicht. Der Nutzen sei der erzeugte Dampfstrom (Nr. E13).

Wichtig bei energetischen Bilanzierungen ist, dass man den **Nullpunkt** oder einen Bezugszustand bei der jeweiligen Energieart festlegt und diesen von einer Systemgrenze zur nächsten beibehält.

So ist

- es zunächst sinnvoll, den Nullpunkt für den Energieinhalt (Enthalpie) bei 0 °C festzuschreiben
- und für Wasser darüber hinaus den flüssigen Zustand anzunehmen.
- für reguläre Brennstoffe und Abfälle der Heizwert (unterer Heizwert) bei 0 °C als Bezugszustand sinnvoll, wenn die Abgase oberhalb des Taupunktes liegen und kein flüssiges Wasser als Kondensat aus den Abgasen im Laufe des Prozesses durch Kühlvorgänge abgezogen wird. Anderenfalls ist der Brennwert als Energieniveau bei 0 °C zu wählen, weil man bei Beibehaltung des Heizwertes sehr schnell den Fehler begehen kann, mehr Energie ab- als zuzuführen, wodurch man falsche, d.h. zu große Wirkungsgrade ermitteln würde.
- bei zugeführten weiteren Stoffen (z.B. Metallen, Betriebshilfsstoffen o.ä.) ebenfalls auf den Bezugszustand zu achten. Hat man z.B. nennenswerte Mengen an Stahl usw. bei entsprechender Temperatur und Verweildauer als *Abbrand* zu berücksichtigen, so ist die chemische Bindungs- bzw. Bildungsenthalpie bei 0 °C – z.B. von Fe (Eisen) nach Fe_2O_3 (*Eisenabbrand*) – als Eichniveau einzusetzen. Dem Eisen (Fe) ist damit in Analogie zum Brennstoff sein *Heizwert* zuzuordnen.

Weiterhin ist zu betonen, dass bei der **Bildung von Wirkungsgraden nur Werte an ein und derselben jeweils gerade betrachteten Systemgrenze verwendet werden dürfen.**

¹⁾ Es werden hier und im Folgenden nur die auf 1 t Abfall (1 t AF) bezogenen Größen aufgeführt. Die jeweiligen Ströme erhält man durch die jeweilige Multiplikation mit dem dem System zugeführten absoluten Abfallmassenstrom m_{AF} .

Im vorliegenden Fall wird

$$\eta_E = \eta_{E, a} = \eta_{E, a, \text{ ohne rück}}^{2)} = \frac{\text{Nr. E13}}{\Sigma E, \text{ ein}} = 79,6 \, \%.$$

Benötigt die Anlage aus dem produzierten Nutzen – hier thermischer Nutzen (Strom E13, Dampf) – einen Teil als Eigenbedarf, so wird dieser rückgeführt, was in Bild 2 dargestellt ist. Die Bilanzgrenze E des Bildes 1 wird um die Rückführung erweitert, so dass man System F erhält, das immer noch als eine *Anlage*, nun jedoch als Anlage *mit Rückführung* (Index *mit rück*) bezeichnet werden kann.

Unter Berücksichtigung des Eigenbedarfes hat die Anlage nun einen Wirkungsgrad

$$\eta_F = \eta_{F, a} = \eta_{F, a, \text{ mit rück}} = \frac{\text{Nr. F12}}{\Sigma F, \text{ ein}} = 78,0 \, \%.$$

Kap. 3.

Nutzungsgrad (Nutzungswirkungsgrad) η_t

Der Nutzungsgrad η_t wird im Folgenden anhand von Prinzipschemata und Beispielen erläutert.

Kap. 3.1.

Prinzip

Im Zusammenhang mit Verlusten wird *manchmal darüber geklagt*, dass Müllverbrennungsanlagen häufig in ihrer Effizienz beeinträchtigt werden, weil sie wegen der Entsorgungspflicht ohne Rücksicht auf die nachgefragte Nutzenergie verbrennen – d.h. Energie umsetzen – müssen und dann folglich der Teil der dargestellten Nutzenergie, der vom Verbraucher nicht abgenommen wird, z.B. durch Kühler *über Dach*, d.h. als Verlust an die Umgebung abgeführt werden muss. Auch bei solchen Sachverhalten lassen sich über einfache Erweiterungen von Systemgrenzen klare Aussagen treffen. Der Übersichtlichkeit wegen wird dies zunächst an dem Prinzipschema 1a sowie Prinzipschema 1b erläutert. Es wird von einer sehr vereinfachten Anlage mit nur drei Zuströmen und zwei Abströmen (Bilanzgrenze X in Prinzipschema 1a) ausgegangen und der Übersichtlichkeit wegen eine Darstellung mit normierten Zahlen gewählt.

²⁾ da keine Energie rückgeführt wird, wird zur weiteren Verdeutlichung der Index *ohne rück* hinzugefügt

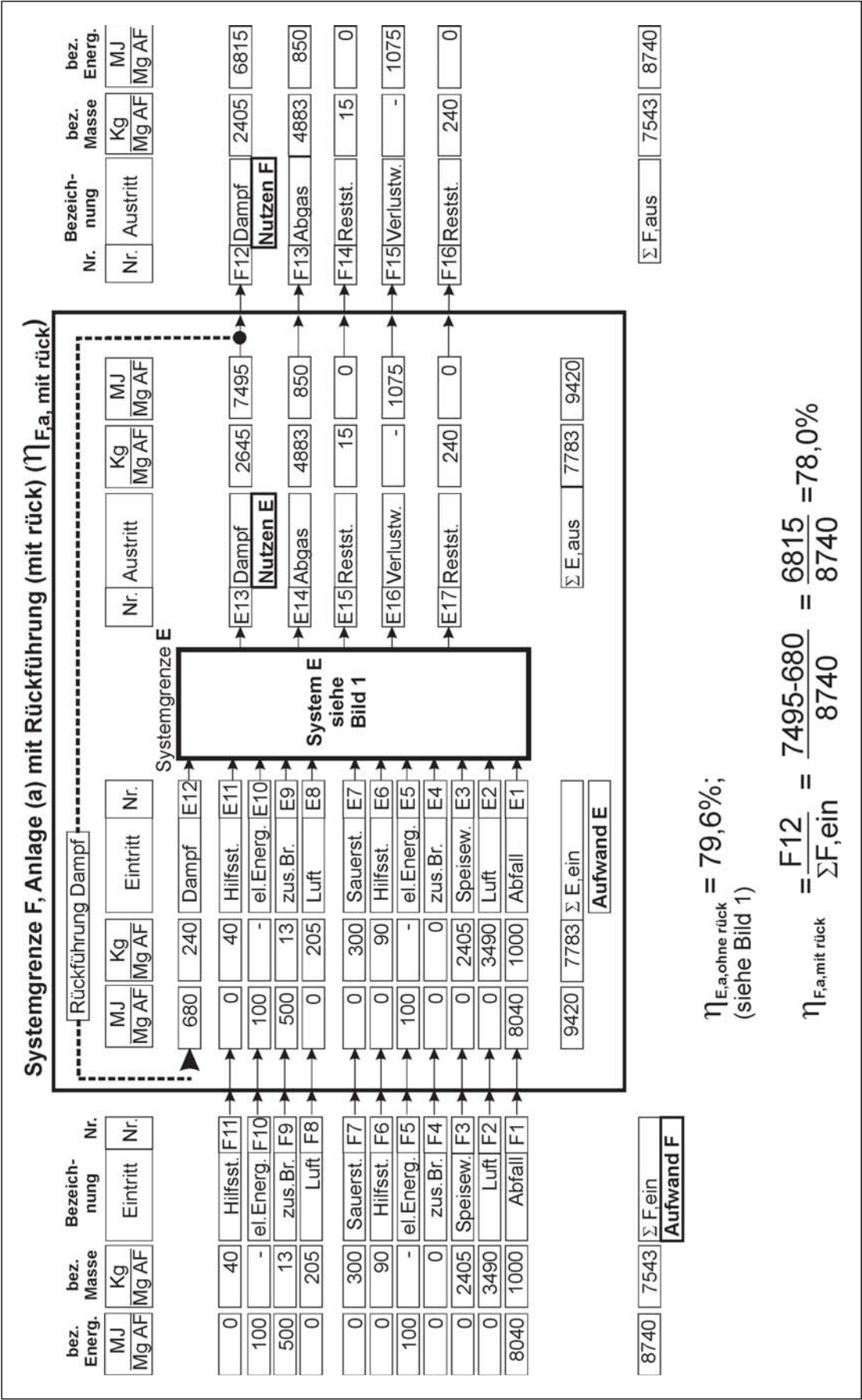


Bild 2: System zur Bildung des Anlagenwirkungsgrades η_F (mit Rückführung)

Prinzipschema 1a; Fall I:

Dem Bilanzraum X (Systemgrenze X) wird mit dem Strom X1 die Abfallenergie (Abfallenthalpie) 100 MJ und mit den Strömen X2 und X3 die Verbrennungsluft und Zusatzbrennstoff – näherungsweise beide mit dem Energieinhalt *Null* – zugeführt. Die Nutzenergie der Anlage (Strom X4) betrage 80 MJ, die Verlustenergie (Strom X5) sei insgesamt 20 MJ und werde hier, da sie spezifisch der Anlage zuzuschreiben ist *Eigenverluste* genannt. Entsprechend der Tabelle in Prinzipschema 1a wird also der Anlagenwirkungsgrad für den Fall I

$$\eta_{X,a} = (\eta_{X,a})_I = \frac{X4}{\Sigma X, \text{ ein}} = 80,0 \, \%$$

Es ist nun grundsätzlich zu berücksichtigen, dass ein Teil der Nutzenergie über einen Kühler geführt werden muss, da die angebotene Nutzenergie der Anlage $h_{\text{Nutz},X} = 80 \text{ MJ}$ nicht immer abgenommen werden kann. Die Systemgrenze X wird daher um den Kühler (Systemgrenze Y) erweitert, so dass sich die Systemgrenze Z, die die Systeme X und Y einschließt, ergibt.

Fall I bedeutet, dass der gesamte Nutzen abgenommen wird (Kühler führt keine Verluste *über Dach* ab). Daher ergibt sich für den Wirkungsgrad an der Bilanzgrenze Z jetzt ein Wirkungsgrad η_Z der zur Veranschaulichung, dass es sich jetzt nicht mehr um eine reine Anlage, sondern um ein System einschließlich des Verhaltens des Nutzers (Energieabnehmers) handelt, noch den Index *t* (für technische Nutzung) als Zusatz erhält. Dieser Wirkungsgrad sollte *Nutzungswirkungsgrad* oder kurz *Nutzungsgrad* genannt werden.

Da im Fall I der Kühler nicht benötigt wird, ist hier der Nutzungsgrad gleich dem Anlagenwirkungsgrad $\eta_{X,a} = \eta_{Z,t}$

$$\eta_{Z,t} = (\eta_{Z,t})_I = \frac{Z4}{\Sigma Z, \text{ ein}} = 80,0 \, \%$$

Prinzipschema 1a; Fall II:

Fall II unterscheidet sich von Fall I dadurch, dass von der angebotenen Nutzenergie der Systemgrenze X $h_{\text{Nutz},X} = 80 \text{ MJ}$ nur $h_{\text{Nutz},Z} = 60 \text{ MJ}$ vom Verbraucher (Nutzer) abgenommen wird, d.h. es müssen jetzt neben den Eigenverlusten zusätzliche Verluste in Höhe von 20 MJ über den Kühler aufgrund des Nutzerverhaltens in Kauf genommen, d.h. über Dach abgeführt werden. Diese Verluste werden daher *Fremdverluste* genannt, um deutlich zu machen, dass sie nicht zu Lasten der Anlage, sondern zu *Lasten der Entsorgungspflicht* der thermischen Abfallbehandlungsanlage gehen. Wie in der Tabelle in Prinzipschema 1a ausgewiesen,

bleibt der Anlagenwirkungsgrad erhalten, d.h. $(\eta_{X,a})_I = (\eta_{X,a})_{II}$

$$(\eta_{X,a})_{II} = 80 \, \%$$

der Nutzungsgrad ($\eta_{z,t}$) sinkt jedoch von $(\eta_{z,t})_I = 80 \%$ auf

$$(\eta_{z,t})_{II} = 60 \%.$$

Prinzipschema 1a; Fall III:

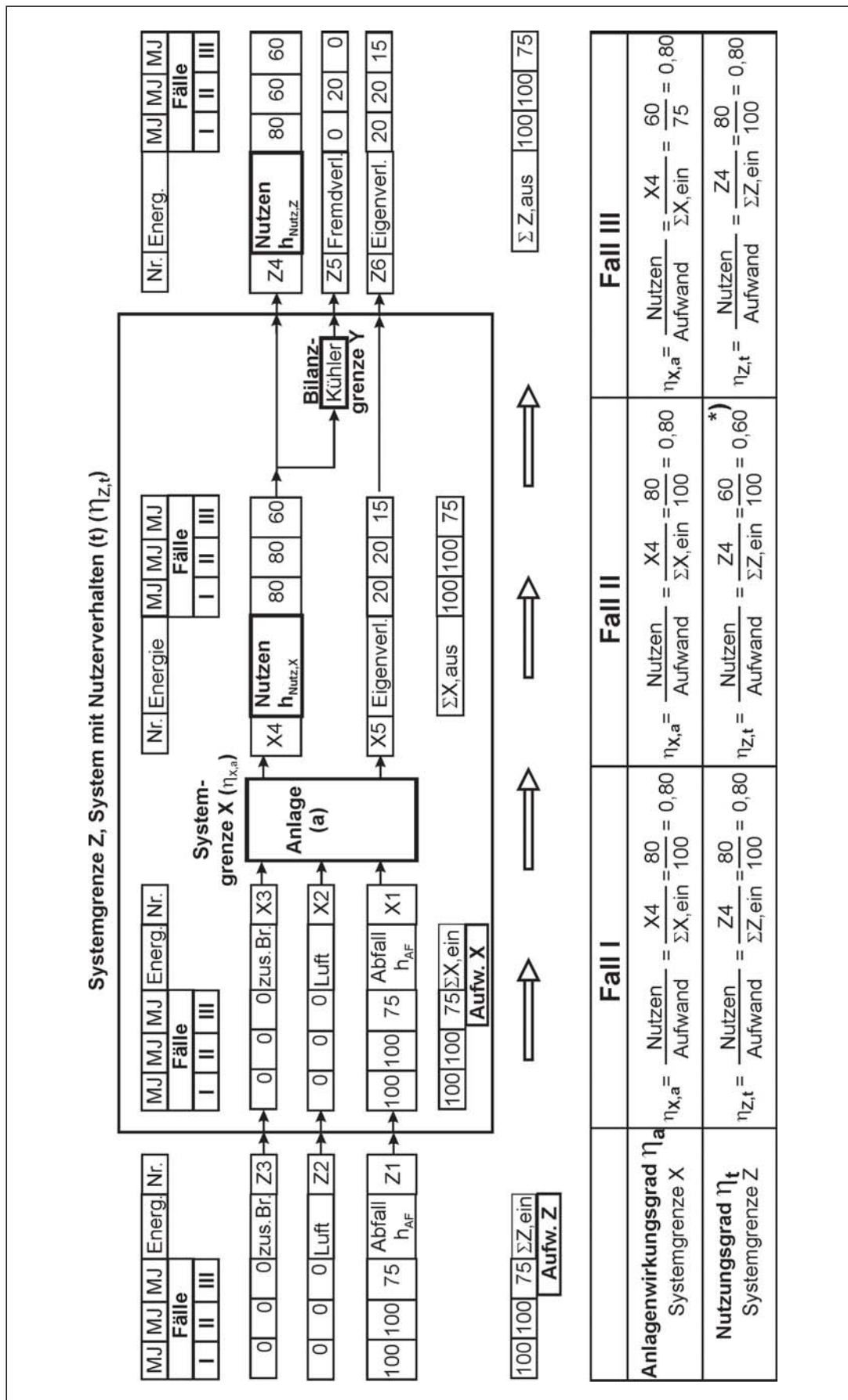
Es bleibe für Fall III die Abnahme des Nutzers gleich, d.h.

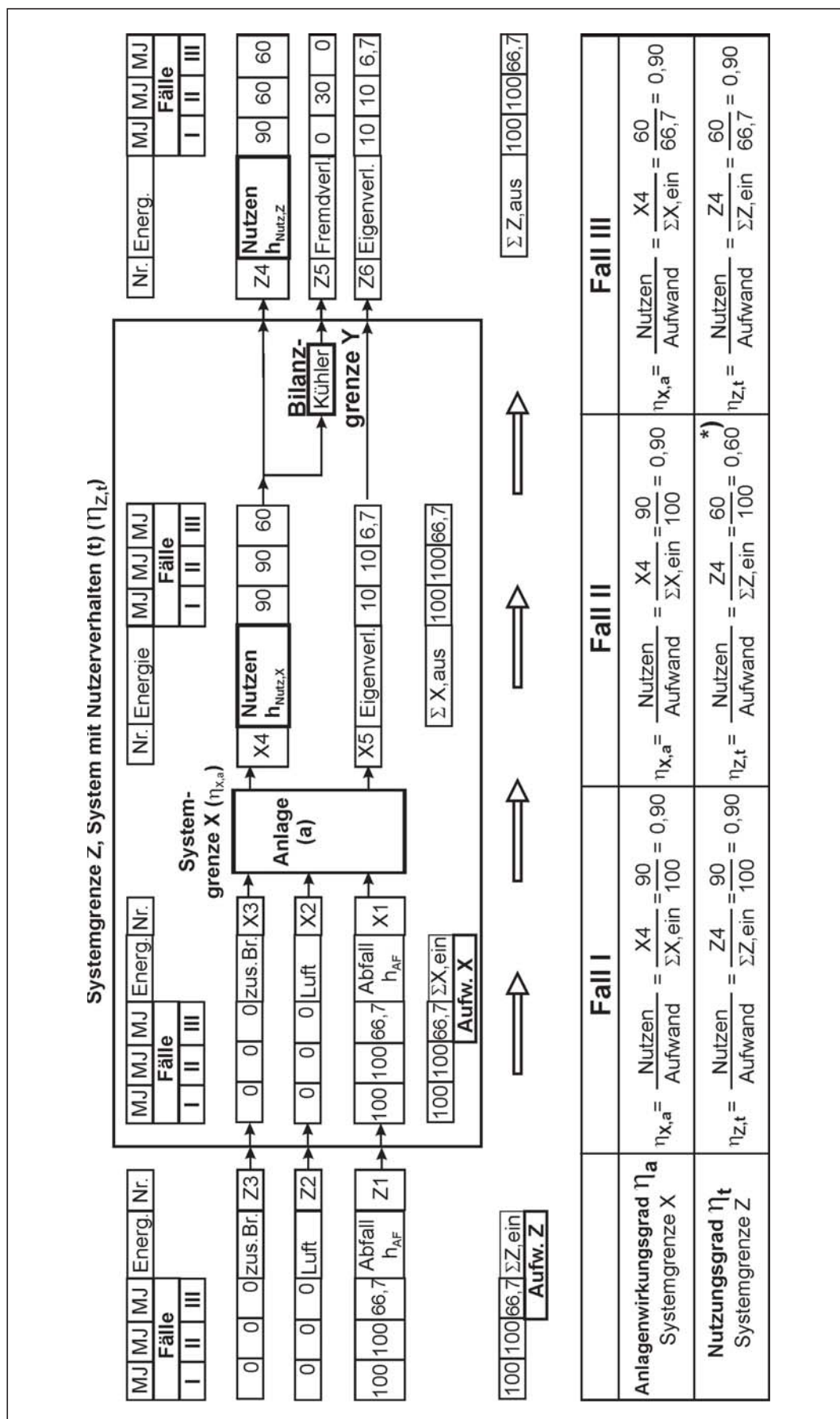
$$(h_{\text{Nutz,Z}})_{II} = (h_{\text{Nutz,Z}})_{III} = 60 \text{ MJ}.$$

Im Unterschied zu Fall II bestehe jedoch die Möglichkeit, die Anlage bezogen auf die Energiezufuhr (Aufwand) soweit *herunterzufahren*, dass ihr Nutzen gerade gleich dem Bedarf des abnehmenden Verbrauchers ist. Der Einfachheit wegen sollen sich die Eigenverluste auch bei Teillast im Vergleich zu Volllast hier prozentual nicht verändern. Die Anlage wird somit auf eine Auslastung von 75 MJ (d.h. Zufuhr von Abfallenergie 75 MJ) *heruntergefahren*. Damit fallen bezogen auf die Systemgrenze X die Eigenverluste auf 15 MJ und die Nutzenergie auf $(h_{\text{Nutz}})_{III} = 60 \text{ MJ}$. Diese kann nun ohne Benutzung des Kühlers vom Nutzer als $(h_{\text{Nutz,Z}})_{III}$ abgenommen werden. Aus der Tabelle in Prinzipschema 1a geht hervor, dass der Anlagenwirkungsgrad nun nach wie vor $(\eta_{x,a})_{III} = 80 \%$ beträgt, der Nutzungsgrad jedoch von Fall II nach Fall III von $(\eta_{z,t})_{II} = 60 \%$ auf $(\eta_{z,t})_{III} = 80 \%$ gestiegen ist. Dies ist auf das Herunterfahren der Anlage von der Energiezufuhr 100 MJ (Fall II) auf die Energiezufuhr 75 MJ (Fall III) zurückzuführen. Es wird also der Anlagenwirkungsgrad $\eta_{x,a}$ hier (näherungsweise) nicht geändert, wohl aber der Nutzungsgrad $\eta_{z,t}$ verbessert. Damit wird das gelegentlich gehörte Argument, dass Müllverbrennungsanlagen häufig *durch Herunterfahren ihren Wirkungsgrad steigern* können, durch Definition solcher Systemgrenzen erklärlich. Angaben von Wirkungsgraden oder anderen Kennzahlen sind ohne gleichzeitige Verdeutlichung von Systemgrenzen wenig hilfreich. Darüber hinaus muss an den Systemgrenzen dargelegt werden, wie Wirkungsgrade und andere Kennzahlen an *aufgehenden Bilanzen* gebildet werden.

Prinzipschema 1b:

Ausgehend von der Situation des Prinzipschemas 1a wird nun die Anlage selbst (d.h. Bilanzkreis X oder Systemgrenze X) optimiert und zwar in der Weise, dass sie nun nur noch 10 % Eigenverluste habe. Es werden nun in derselben Weise wie bei dem Prinzipschema 1a die Fälle I bis III durchlaufen. Man erkennt aus den Zahlen des Prinzipschemas die Veränderungen der Wirkungsgrade. Besonders hingewiesen sei darauf, dass sich für Fall II, d.h. im Falle des Abführens von Energie *über Dach* durch den Kühler, der Nutzungsgrad in Prinzipschema 1a gegenüber Prinzipschema 1b nicht verändert hat (60 %, in den Schemata jeweils mit einem * gekennzeichnet). Dies ist unmittelbar verständlich, wenn man sich vor Augen hält, dass die Optimierung einer Anlage (Systemgrenze X) dann keine Verbesserung für das Gesamtsystem Z ergibt, wenn der durch Optimierung nun größer gewordenen Nutzenergie $h_{\text{Nutz,X}}$ der Anlage keine veränderte Abnahme von Energie durch den Verbraucher (Nutzer) gegenübersteht. Das Mehrangebot an Nutzenergie der optimierten Anlage wird über den Kühler als entsprechend höherer Fremdverlust an die Umgebung abgegeben.


Prinzipschema 1a: Prinzip der Bildung des Nutzungsgrades η_t (Erklärung im Text); *) Zusatzhinweis im Text



Prinzipschema 1b: Prinzip der Bildung des Nutzungsgrades η_i (Veränderung des Anlagenwirkungsgrades gegenüber Prinzipschema 1a; Erklärung im Text); *) Zusatzhinweis im Text

Kap. 3.2.

Beispiele

In Fortführung des Bildes 2 (System F) wird dieses zu den Bildern 3.1 und 3.2 erweitert. Zunächst wird Bild 2 vollständig als System F in die Bilder 3.1 und 3.2 übertragen. Es sind jedoch der Übersichtlichkeit wegen folgende Vereinfachungen getroffen:

- Es werden nur noch Energiebilanzen betrachtet (keine Massenbilanzen).
- Beim Eintritt werden nur die Stoffströme F1 und F2 (Abfall und Luft) einzeln aufgeführt; die übrigen Ströme werden zu einem einzigen Strom, mit *F3 bis F11* bezeichnet, als Summe zusammengefasst und – neben Abfall und Luft – als zusätzlich erforderliche Energie (e_{zus})³⁾ bezeichnet.
- Beim Austritt wird nur der Nutzstrom Nr. F12 einzeln übernommen. Die restlichen Ströme werden aufsummiert zu einem einzigen, mit *F13 bis F16* bezeichnet, zusammengefasst.

In den Bildern 3.1 und 3.2 wird nun ausgehend von der Systemgrenze F analog zu dem Prinzipschema 1a eine Erweiterung des Systems F durch Hinzunahme eines Kühlers (System G) vorgenommen, so dass man System H erhält. Der Nutzstrom F12 wird in einen Teilstrom H4, der den Nutzen für den Verbraucher (Abnehmer, Nutzer) darstellt, und in einen Teilstrom H5 aufgeteilt, der den durch den Verbraucher verursachten Fremdverlust darstellt. Aus weiter unten noch erläuterten Gründen wird hier noch ein weiterer Strom H6 eingerichtet, der vorerst nicht benötigt wird, und daher hier als Leerstrom (mit *leer* = physikalisch nicht vorhanden) bezeichnet wird. Es ist nun

- in Bild 3.1 der Fall I (vgl. Prinzipschema 1a), d.h. dass der Verbraucher den gesamten *angebotenen* Nutzstrom abnimmt (Kühler nicht nötig)

und

- in Bild 3.2 der Fall II (vgl. Prinzipschema 1a), d.h. dass der Verbraucher nur einen Teil des angebotenen Nutzstromes abnimmt (Kühler wird benötigt),

dargestellt. Die Bildung des Nutzungsgrades $\eta_{\text{H,t}}$ geht aus der Legende der Bilder 3.1 und 3.2 hervor. Der Vollständigkeit wegen sind noch einmal die Anlagenwirkungsgrade $\eta_{\text{E,a}}$ und $\eta_{\text{F,a}}$ aus den vorangegangenen Bildern mit angegeben.

³⁾ Der Dampfmassenstrom F12 wird, wenn er seinen Energieinhalt (Energiestrom F12) abgegeben hat, zurückgeführt und erscheint dann als Speisewassermassenstrom F3 am Eintritt. Der Energiestrom F3 gehört natürlich nicht zur zusätzlich erforderlichen Energie (e_{zus}). Da näherungsweise dem Energiestrom F3 der Wert *Null* zugewiesen wird, begeht man hier keinen Fehler, wenn die Energie in dem Strom von F3 der Einfachheit halber mit zu der Summe *F3 bis F11* gezählt wird.

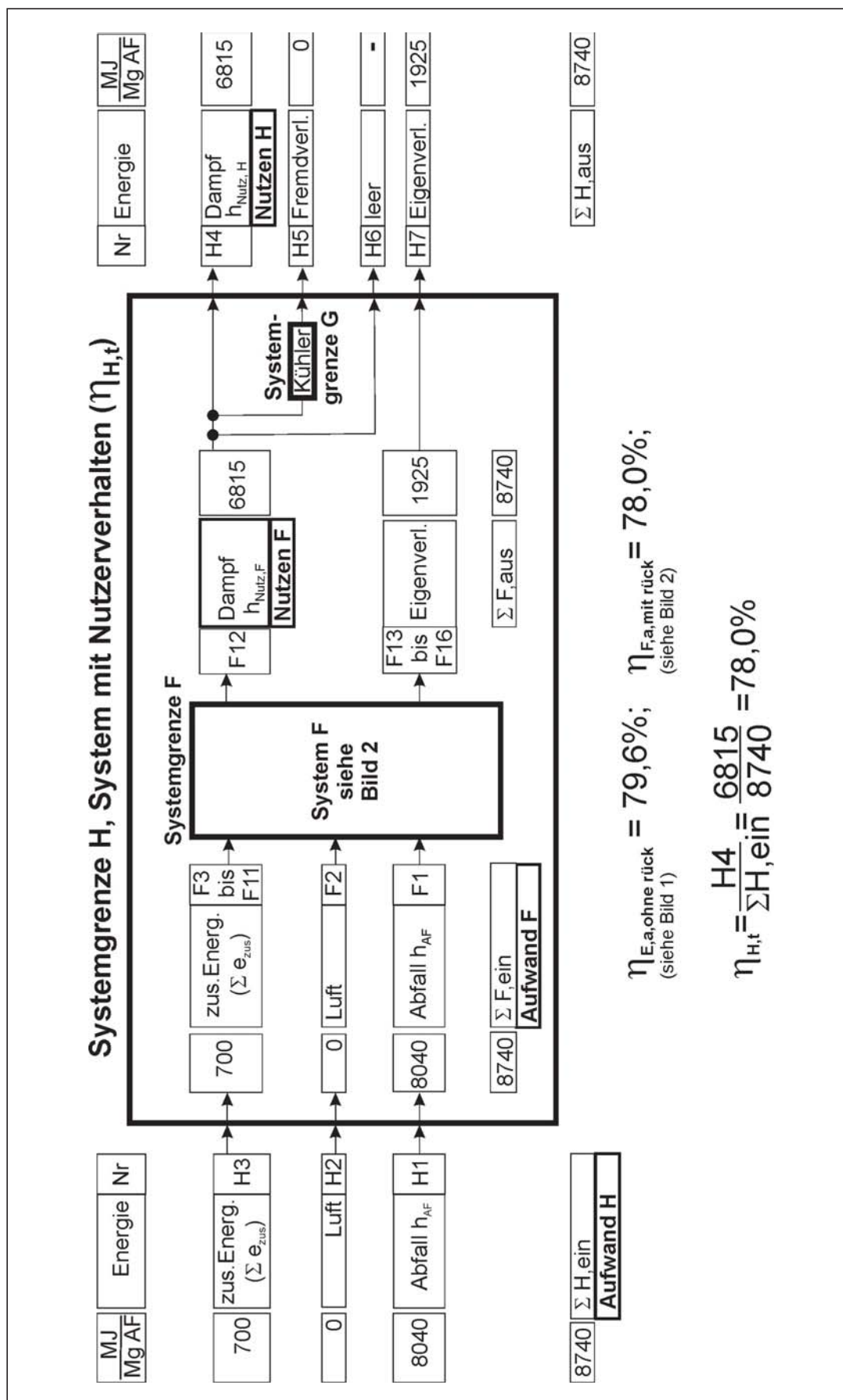


Bild 3.1: System zur Bildung des Nutzungsgrades η_i (Beispiel 1)

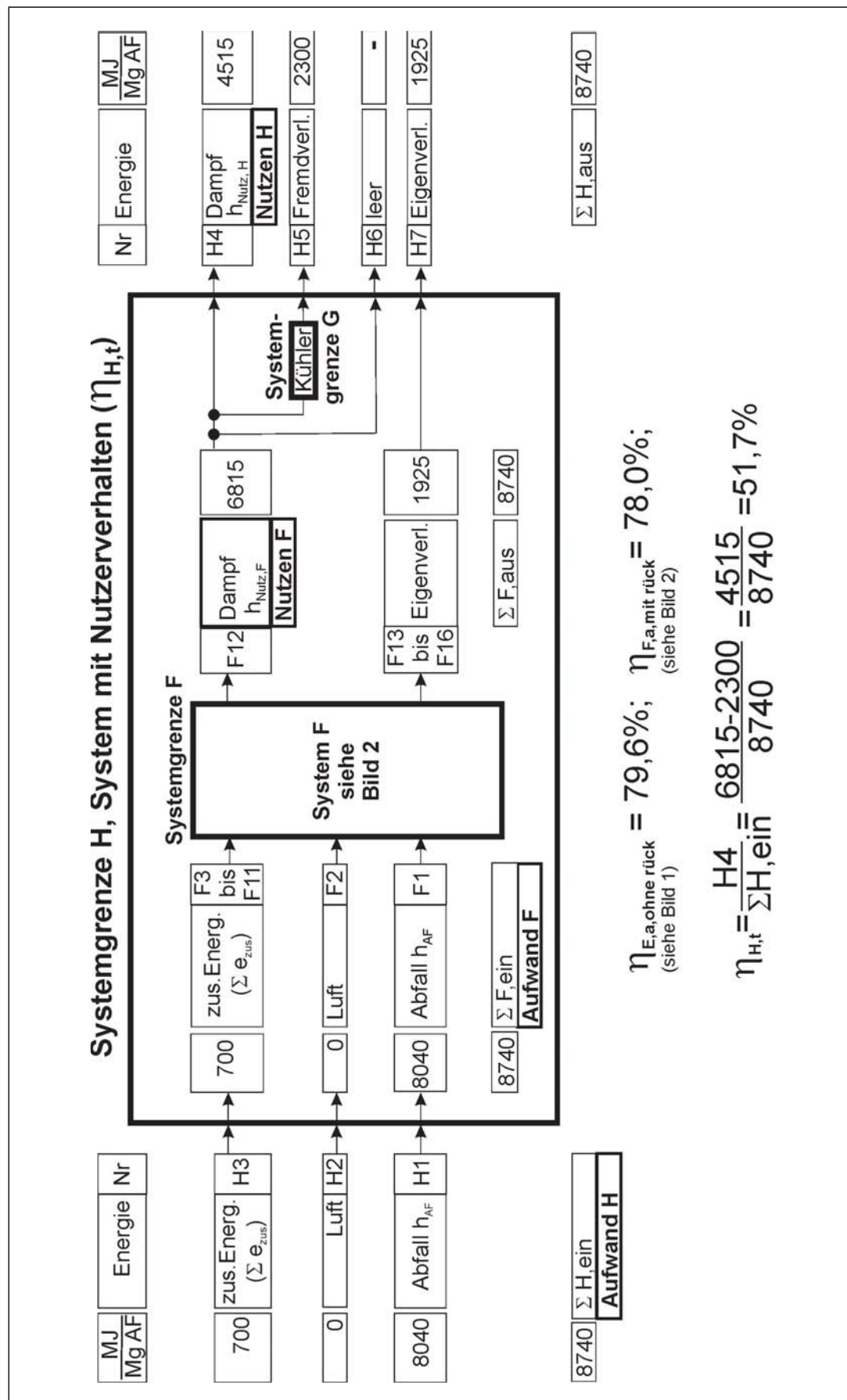


Bild 3.2: System zur Bildung des Nutzungsgrades η_t (Beispiel 2)

Kap. 4.

Primärwirkungsgrade η_p

Bisher sind Anlagenwirkungsgrade η_a von der Systemgrenze A bis zur Systemgrenze F und Nutzungsgrade η_t (Systemgrenze H) betrachtet worden.

In der Regel benötigen Verbrennungsanlagen für ihren Betrieb Primärressourcen, die durch Erweiterung der Systemgrenzen zu Primärwirkungsgraden η_p führen, wie im Folgenden gezeigt wird.

Kap. 4.1.

Prinzip

Bevor die vorgenannten Beispiele fortgeführt werden, wird zunächst das Prinzip anhand des Prinzipschemas 2 erläutert. Die betrachtete Anordnung habe den Anlagenwirkungsgrad (Systemgrenze R oder Bilanzkreis R)

$$\left(\eta_a = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{e_{\text{Nutz}}}{h_{\text{AF}} + \Sigma e_{\text{zus}}} \right)_R$$

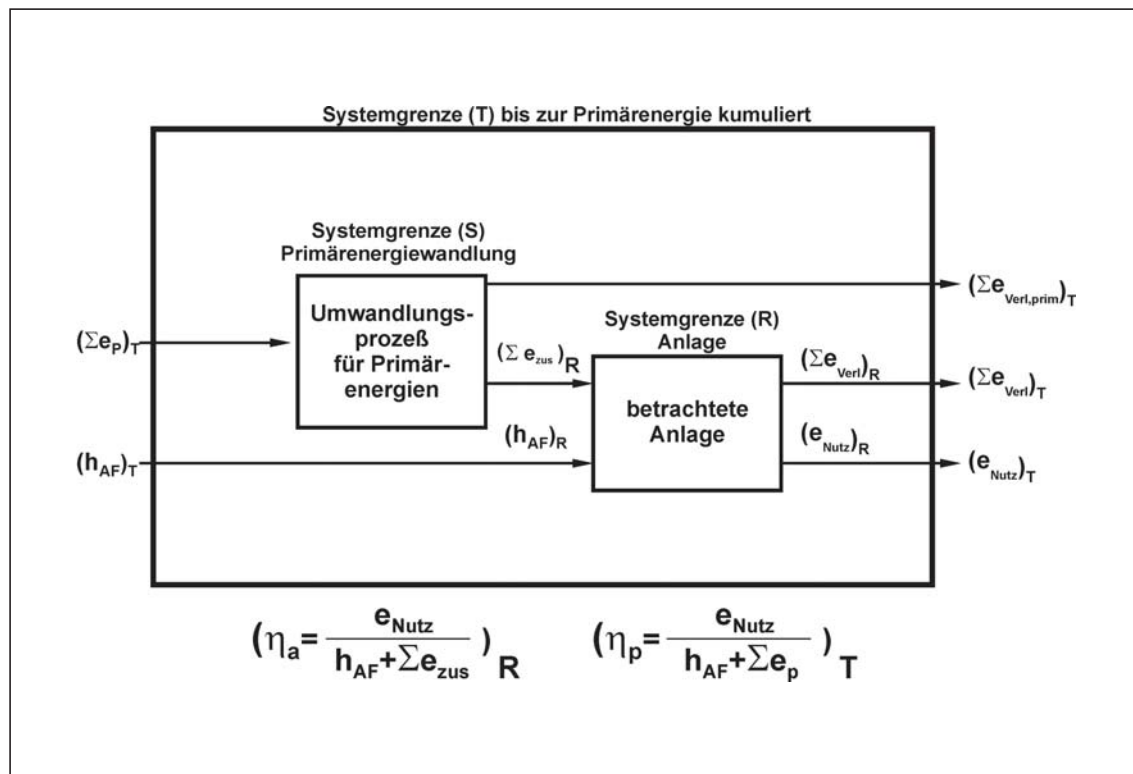
Für den Betrieb des Systems R ist zusätzlich – neben Abfall – die Energie (e_{zus}) erforderlich. Diese muss durch Umwandlung von Primärenergie (Systemgrenze S) bereitgestellt werden, d.h. es ist z.B. Primärenergie

- für die Bereitstellung der elektrischen Energie,
- für eine eventuelle Sauerstofferzeugung,
- zur Erzeugung von anderen Betriebs- und Hilfsstoffen usw.

notwendig. Durch Einbeziehen dieser benötigten Primärenergie e_p mit den zugehörigen Umwandlungsprozessen (System S) erhält man das kumulierte System (T) im Prinzipschema 2, das die Systeme R und S einschließt. Der so genannte Primärwirkungsgrad ist dann an der Systemgrenze (T) wie folgt zu bilden,

$$\left(\eta_p = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{e_{\text{Nutz}}}{h_{\text{AF}} + (\Sigma e_p)} \right)_T$$

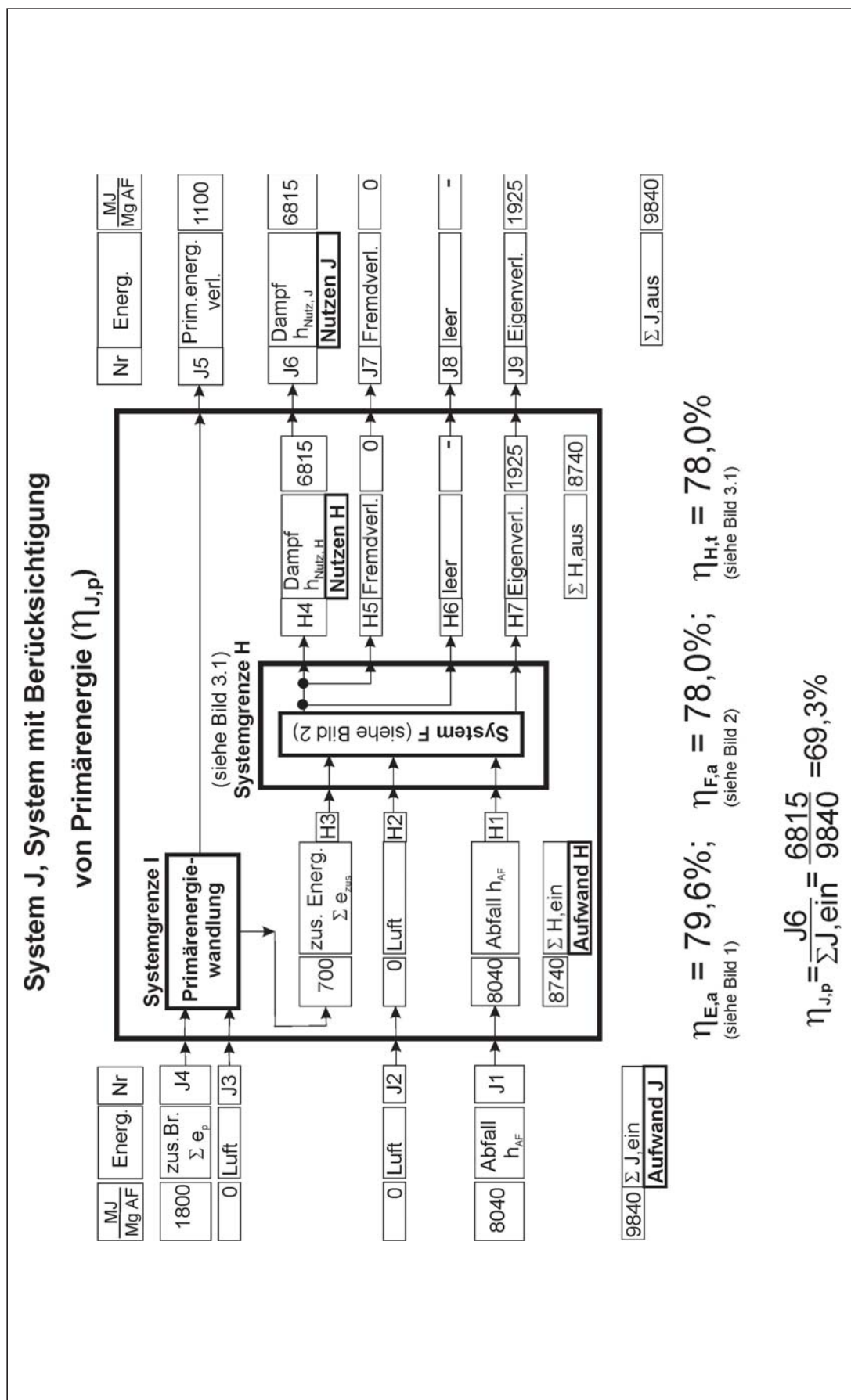
Er kann erheblich kleiner sein als der Anlagenwirkungsgrad. Bei dieser Betrachtungsweise handelt es sich um eine so genannte *kumulierte* Darstellung der wichtigsten vor- und eventuell nachgeschalteten Prozesskettenglieder. Ausgangspunkt der kumulierten Betrachtung sind die benötigten Primärenergien und Rohstoffe für die thermische Behandlung des Abfalls.


Prinzipschema 2: Prinzip der Bildung des Primärwirkungsgrades η_p

Kap. 4.2.

Beispiele

Analog von den Bildern 3.1 und 3.2 werden diese zu den Bildern 4.1 und 4.2 erweitert, indem Primärenergieumwandlungsprozesse einbezogen werden. In den Bildern 4.1 und 4.2 ist jeweils das *System Primärenergieumwandlung* (Systemgrenze I) zu dem bislang erarbeiteten System H (Bilder 3.1 und 3.2) hinzugefügt, so dass man das bis zum Einsatz von Primärenergie zurückverfolgte, d.h. kumulierte System J erhält. Es sei hier nicht erläutert, wie für die benötigte Zusatzenergie $e_{\text{zus}} = 700 \text{ MJ/t Abfall}$ (Strom H3) im Einzelnen aufgeschlüsselt die benötigte Primärenergie $e_p = 1.800 \text{ MJ/t Abfall}$ (Strom J4) ermittelt wird. Die Verluste aus dem Primärumwandlungsprozess $1.100 \text{ MJ/t Abfall}$ werden als Strom J5 aus dem Bilanzkreis J abgeführt. In Bild 4.1 ist der Fall I (vgl. Bild 3.1) und in Bild 4.2 der Fall II (vgl. Bild 3.2) dargestellt. Die Bildung der Primärwirkungsgrade geht aus der Legende der Bilder hervor. Der Vollständigkeit halber sind die Wirkungsgrade $\eta_{E,a}$ und $\eta_{F,a}$ sowie die Nutzungsgrade $\eta_{H,t}$ nochmals mit aufgeführt.


 Bild 4.1: System zur Bildung des Primärwirkungsgrades η_p (Beispiel 1)

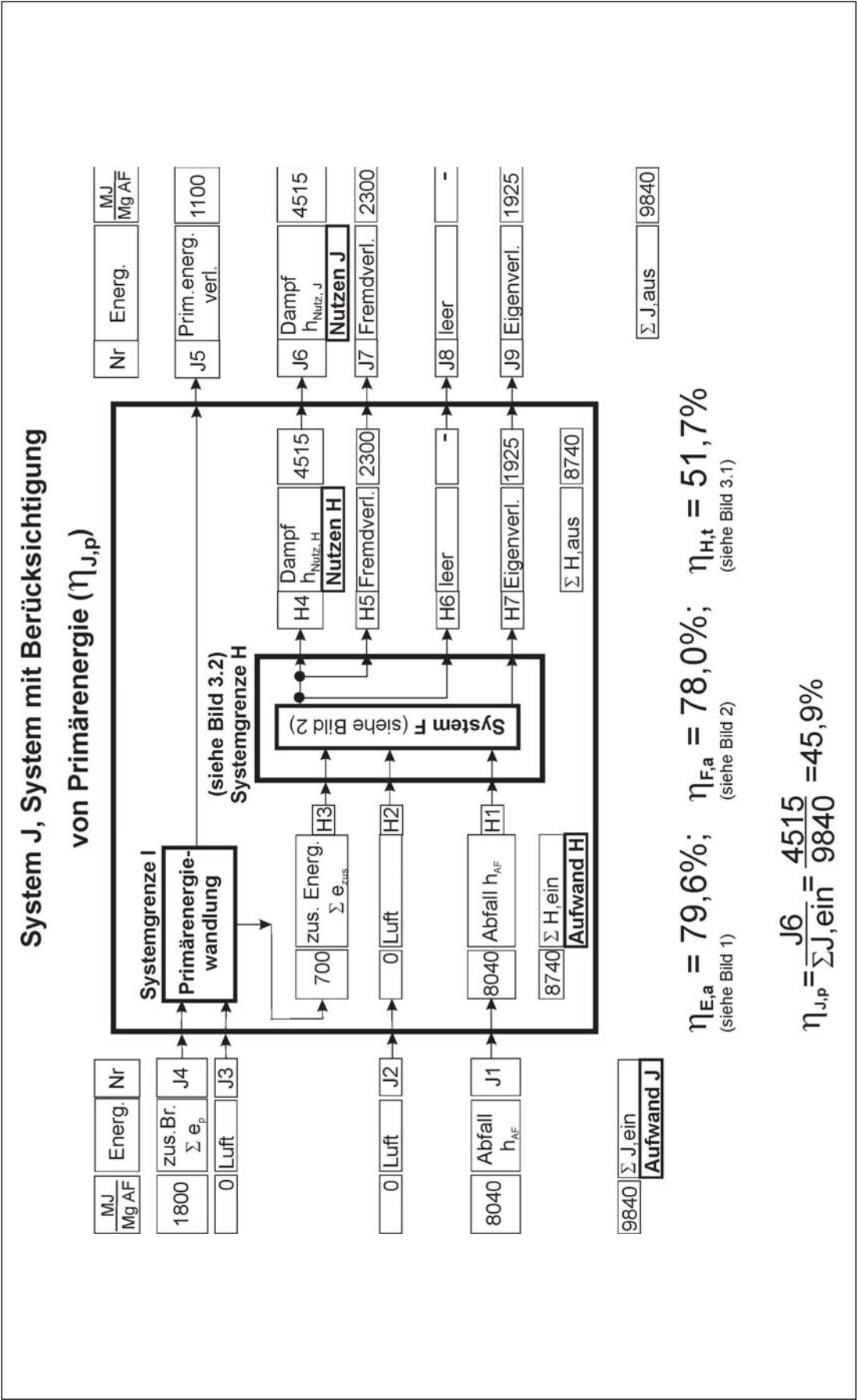


Bild 4.2: System zur Bildung des Primärwirkungsgrades η_p (Beispiel 2)

Kap. 5.

Nettoprimärwirkungsgrade η_n

Auch die Nettoprimärwirkungsgrade η_n werden im Folgenden anhand von Prinzipschemata und Beispielen erläutert.

Kap. 5.1.

Prinzip

Der zur Behandlung erforderliche Primärenergieaufwand könnte als Ressource geschont werden, wenn es den zu behandelnden Abfall nicht gäbe. Man kann folglich einen *Abfallnutzen* e_{Netto} bilden, indem man von dem Prinzipschema 2 ausgeht und von der Nutzenergie e_{Nutz} (Systemgrenze T) die für das System T benötigte Primärenergie e_p abzieht. Es würden also die Primärressourcen dann durch *eigene erzeugte* Nutzenergie ersetzt d.h. substituiert d.h. gedanklich rückgeführt⁴⁾, wie in Prinzipschema 3 durch Erweiterung der Systemgrenze T mit Rückführung der Primärenergie e_p bis zur Systemgrenze U dargestellt ist. Es verbleibt damit als Aufwand bei dem System U nur noch die zugeführte Abfallenergie h_{AF} , d.h. es wird keine Fremdenergie mehr benötigt. Als Nutzen verbleibt dann nur die Nettoenergie e_{Netto} System U, die ausschließlich der Wirkung des Abfalls zuzuordnen ist. Dementsprechend bezeichnet man den zugehörigen Wirkungsgrad als *Nettowirkungsgrad*. An dem System U ergibt sich folglich

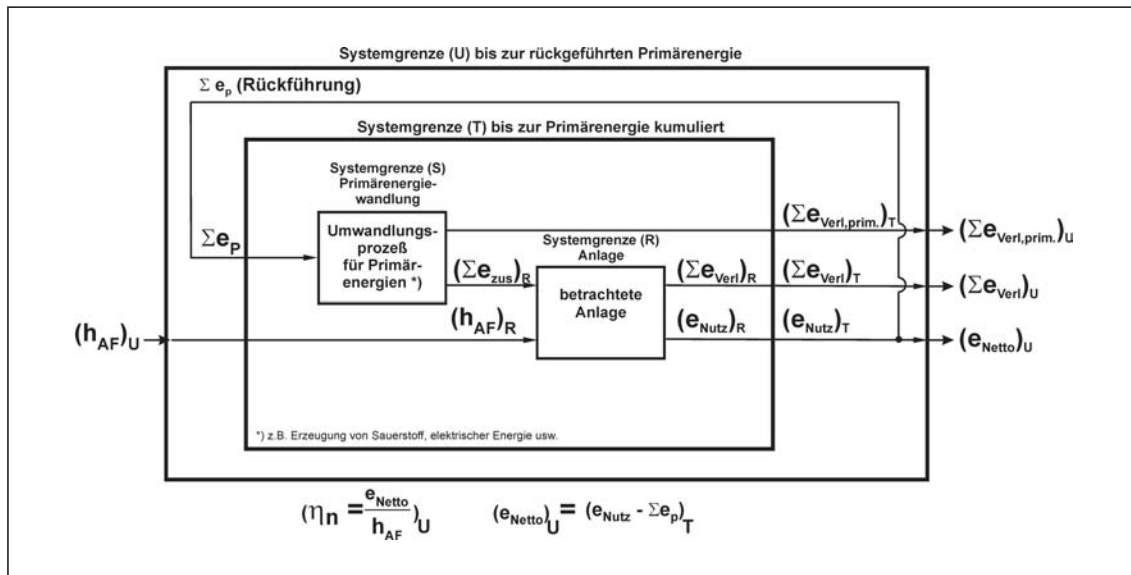
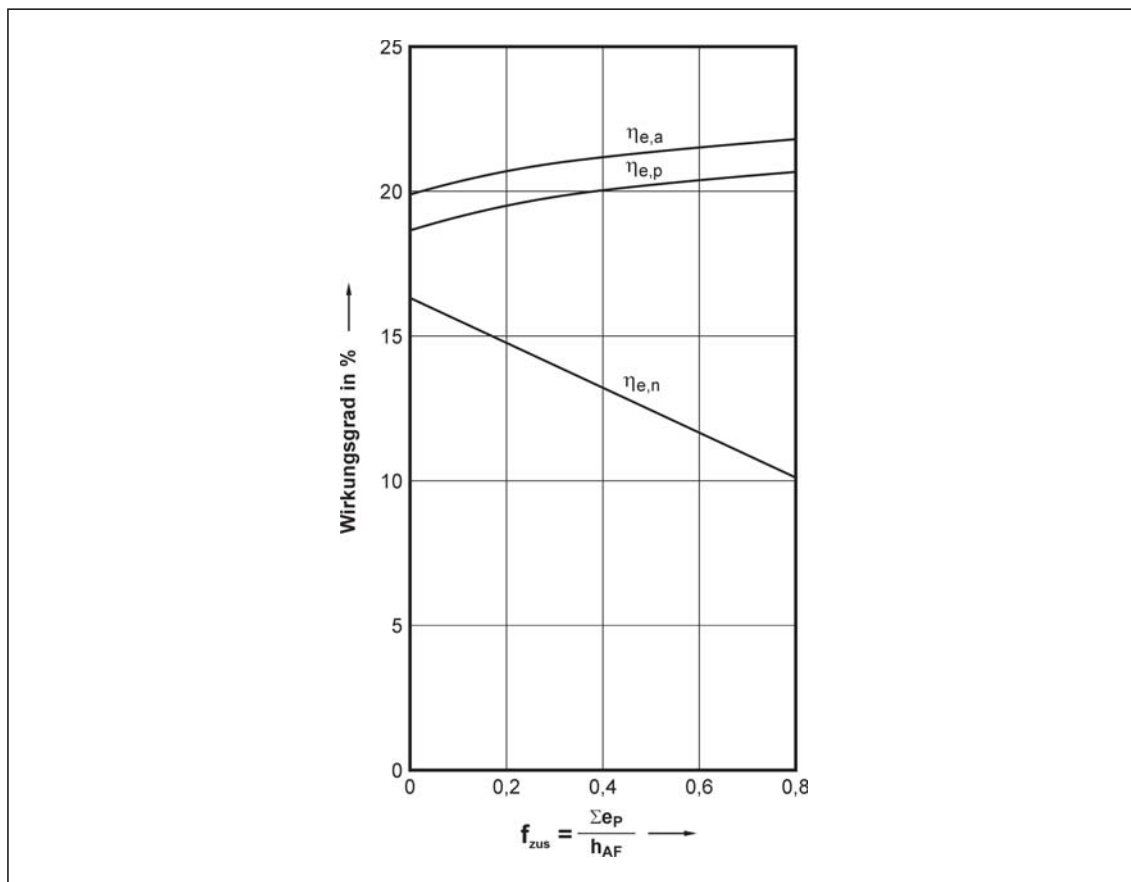
$$\left(\eta_n = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{e_{\text{Netto}}}{h_{\text{AF}}} \right)_U \quad (e_{\text{Netto}})_U = (e_{\text{Nutz}} - \sum e_p)_T$$

für $(e_{\text{Netto}})_U \geq 0$.

Erhält man für η_n einen Wert $\eta_n > 0$, wird aus dem Abfall ein energetischer Nutzen gezogen. Eine Abfallverbrennungsanlage hat dann über das Mindestziel der stofflichen Entsorgung (eventuell stoffliche Verwertung der Reststoffe) noch zusätzlich den Aspekt der energetischen Verwertung erfüllt.

Die Bildung eines Nettowirkungsgrades η_n ist vor einem weiteren Hintergrund sinnvoll: Man sollte sich bemühen, für eine Abfallbehandlung möglichst wenig

⁴⁾ Hier ist es sehr wichtig darauf hinzuweisen, dass die Substitution von einer Energieart (z.B. Erdgasenthalpie) durch eine andere (z.B. erzeugte Dampfenthalpie) in der Regel nicht im gleichen Verhältnis (1:1) erfolgen kann, d.h. dass in der Regel die zu substituierende Energiemenge (z.B. an Erdgas gebunden) nicht durch eine gleich hohe Ersatzenergiemenge (z.B. an Dampf gebunden) ersetzbar ist. Dieser Sachverhalt wird durch das sog. Energieaustauschverhältnis f_{sub} als Verhältnis von Substitutionsenergie zu der zu substituierenden Energie ausgedrückt. Häufig ist $f_{\text{sub}} > 1$ und hängt von vielen Faktoren ab. Der Übersichtlichkeit wegen wird hier $f_{\text{sub}} = 1$ gesetzt, um das Prinzip der Substitution oder der Energierückführung so einfach, wie in Prinzipschema 3 dargestellt, zu veranschaulichen. Was die Ermittlung von f_{sub} betrifft, wird auf [z.B. 2, 3, 8, 10, 13] verwiesen.


Prinzipschema 3: Prinzip der Bildung des Nettoprimärwirkungsgrades η_n

Prinzipschema 4: Anlagenwirkungsgrad $\eta_{e,a}$, Primärwirkungsgrad $\eta_{e,p}$, Nettoprimärwirkungsgrad $\eta_{e,n}$, (jeweils elektrisch Index e) in Abhängigkeit des Verhältnisses f_{zus} , d.h. des Verhältnisses von erforderlicher Primärenergie e_p zu der Abfall-energie h_{AF}

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden: Teubner-Reihe UMWELT, B. G. Teubner GmbH, 2001, ISBN 3-519-00402-X

Primärenergie einzusetzen. Verwendet man z.B. bei gleichbleibender Abfallenthalpie h_{AF} zusätzlich laufend steigende Primärenergie e_p (z.B. Erdgas), so ergeben sich sowohl für den Anlagenwirkungsgrad η_a als auch den Primärwirkungsgrad η_p steigende Werte. Dies ist physikalisch und technisch zwar richtig, bringt aber nicht unmittelbar zum Ausdruck, dass der steigende Wirkungsgrad durch zusätzlichen Verbrauch von Primärressourcen *erkauft* wird. Der Nettoprimärwirkungsgrad hingegen sinkt mit laufend steigendem Einsatz von Primärenergieressourcen, d.h. er verdeutlicht den Zusatzaufwand an Primärenergie (vgl. Prinzipschema 4: hier nicht an thermischen sondern an elektrischen Wirkungsgraden qualitativ verdeutlicht).

Kap. 5.2.

Beispiele

Ausgehend von den Bildern 4.1 und 4.2 werden diese zu den Bildern 5.1 und 5.2 erweitert, indem nun die benötigte Primärenergie durch eigenerzeugte Nutzenergie substituiert wird.

Es wird das System J aus den Bildern 4.1 und 4.2 in die Bilder 5.1 und 5.2 übernommen und von dem jeweiligen Nutzen des Systems J die benötigte Primärenergie abgezogen, d.h. rückgeführt. Dadurch ergibt sich die neue Systemgrenze K, in die nun nur noch Abfall und Luft eintreten. Der die Systemgrenze K verlassende Nutzstrom ist damit netto die Energie, die wirklich nur dem Abfall als einzigem Aufwand zuzuschreiben ist.

Wichtig sind zwei Bemerkungen:

- Der Übersichtlichkeit und Einfachheit wegen wird in den Bildern bei der Rückführung ein Energieaustausch- oder Energiesubstitutions- oder Energierückführungsverhältnis f (Index *sub* für Substitution) $f_{sub} = 1$ angenommen (vgl. Fußnote 4).
- Ebenfalls der Übersichtlichkeit und Einfachheit wegen sind die aufgeführten Beispiele nur mit thermischer Energiewandlung dargelegt, d.h. der Nutzen fällt auch nur thermisch an. Daher ist die Energiesubstitution hier direkt mit der Primärenergie als Zusatzbrennstoff durchgeführt. Hat man elektrische Energieerzeugung im Prozess, könnte man natürlich den elektrischen Anteil unmittelbar aus dem abgeführten elektrischen Nutzen abzweigen und direkt an einer inneren Systemgrenze rückführen. Diese würde, auf die Bilder 5.1 und 5.2 bezogen, jedoch eine detailliertere Zeichnung mit Erweiterung um einen Kraftwerksprozess mit elektrischem Generator, zugehörigen Verlusten usw. bedeuten.

In Bild 5.1 ist analog zu Bild 4.1 der Fall I und in Bild 5.2 analog zu Bild 4.2 der Fall II dargestellt. Die Bildung der Nettoprimärwirkungsgrade $\eta_{K,n}$ geht aus der Legende der Bilder hervor. Der Vollständigkeit wegen sind die Wirkungsgrade $\eta_{E,a}$, $\eta_{F,a}$, die Nutzungsgrade $\eta_{H,t}$ sowie die Primärwirkungsgrade $\eta_{J,p}$ nochmals mit aufgeführt.

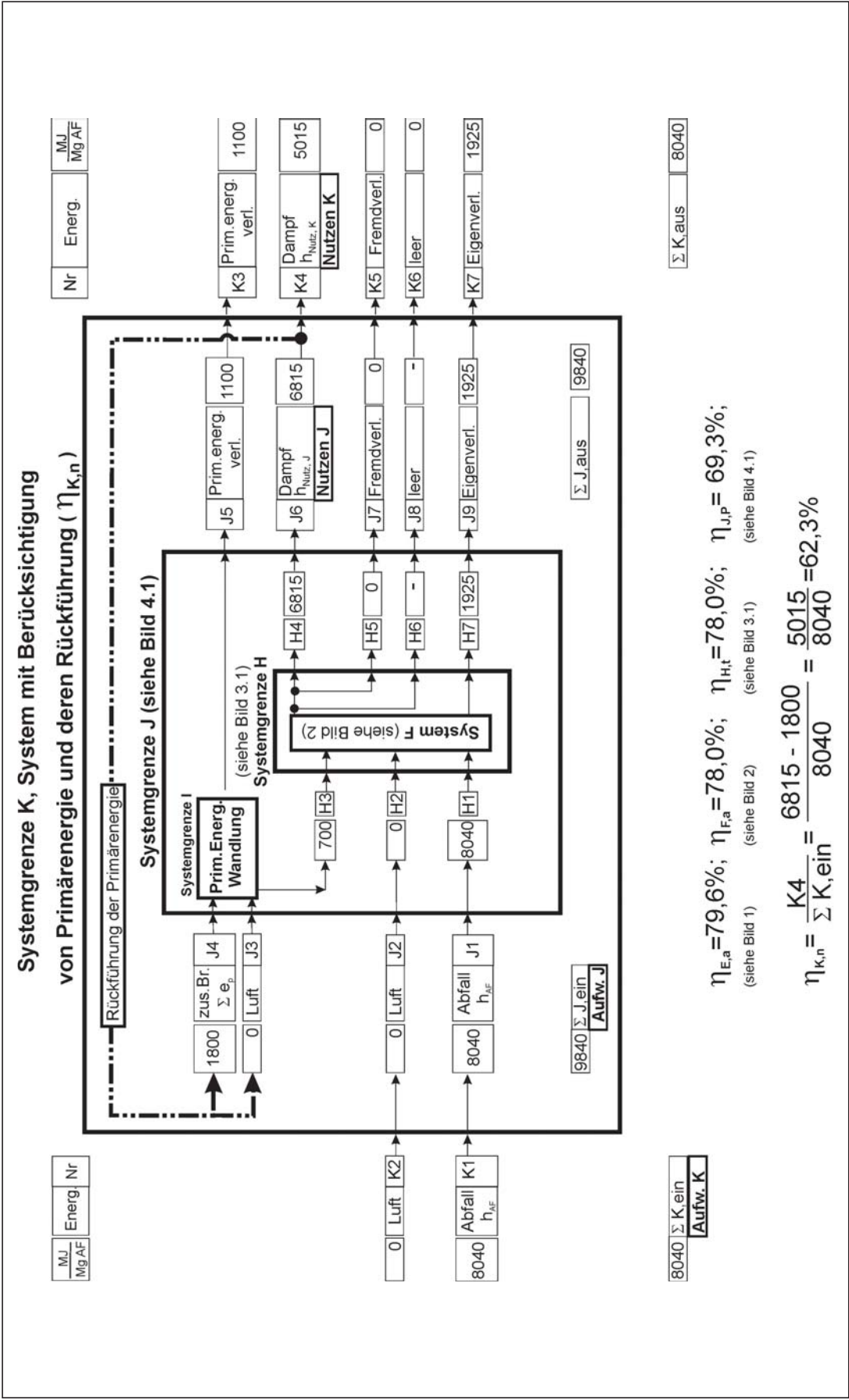


Bild 5.1: System zur Bildung des Nettoprimärwirkungsgrades η_n (Beispiel 1)

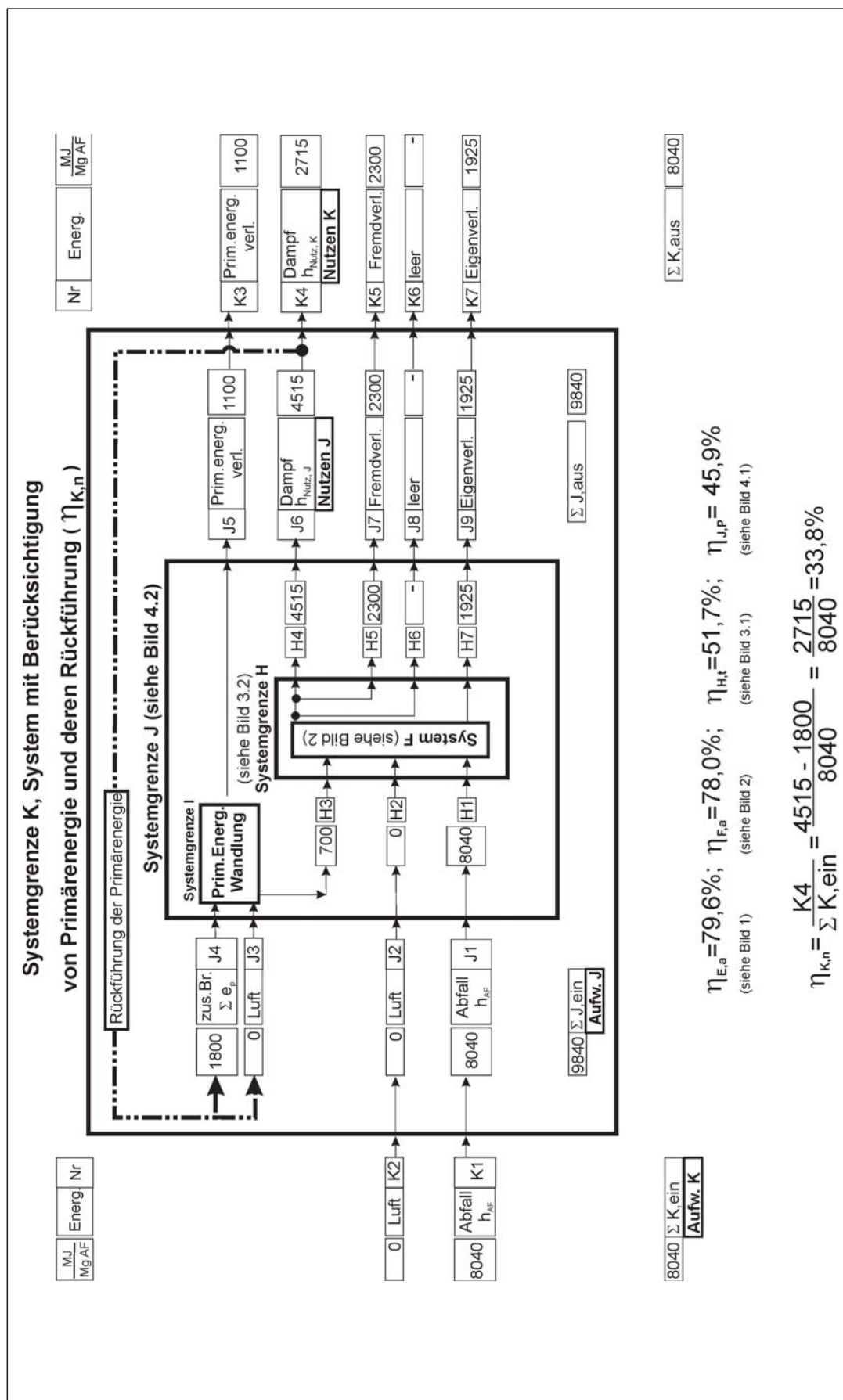


Bild 5.2: System zur Bildung des Nettoprimärwirkungsgrades η_n (Beispiel 2)

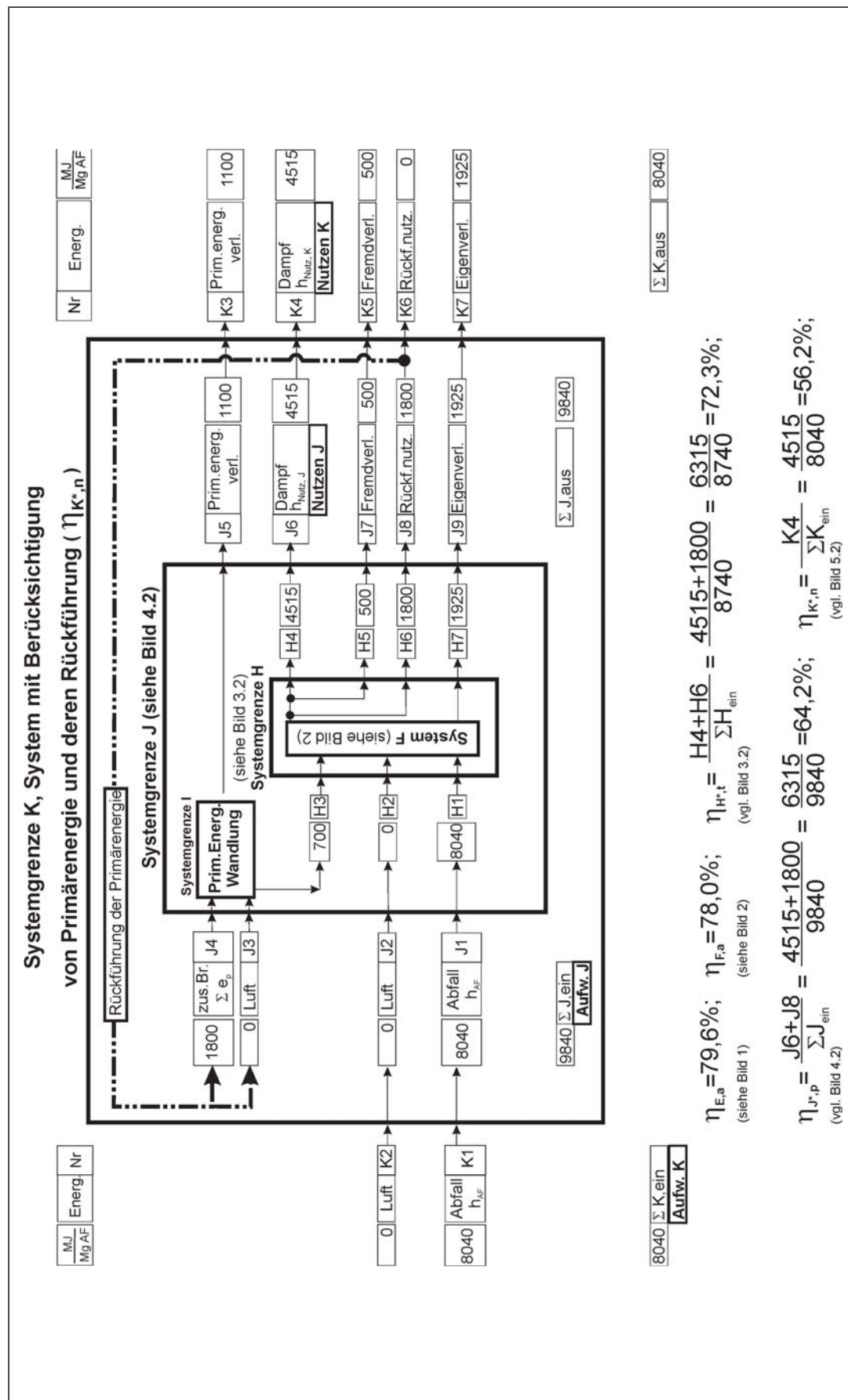


Bild 5.3: System zur Bildung des Nettoprimärwirkungsgrades η_n (Beispiel 3)

In Bild 5.2 fällt der sehr schlechte Wirkungsgrad $\eta_{K,n} = 33,8 \%$ auf. Dies liegt daran, dass sehr viel Energie über den Kühler (System G) nutzlos über Dach geführt wird, was nicht der Anlage (System F) zuzuschreiben ist, sondern am Nutzverhalten (System H) liegt. Da die Fremdverluste (System H) an der Anlage selbst (System F) als Nutzungspotential vorliegen, kann man aus diesem Nutzen, wie in Bild 5.3 dargestellt, die benötigte Primärenergierückführung zur Verfügung stellen. Im Unterschied zu Bild 5.2 ist daher in Bild 5.3 der erforderliche Primärenergiestrom J4 aus dem Strom H6 und J8 abgedeckt (substituiert, rückgeführt). Über den Kühler wird jetzt lediglich noch der Strom H5 (500 MJ/t Abfall), d.h. ein wesentlich kleinerer Verlust abgeführt. Da in Bild 5.3 die gleichen Systemgrenzen und Aufteilungen wie in Bild 5.2 verwendet sind, jedoch eine andere Verwendung des Anlagennutzens (Ströme H4 und H6) vorgenommen ist, sind jetzt die betroffenen Systeme zur Unterscheidung mit dem Hochindex * versehen.

Kap. 5.3.

Aufwandsgrad

Im Falle eines hohen benötigten Primärenergieeinsatzes kann die Differenz (siehe Prinzipschema 3)

$$\begin{aligned} (e_{\text{Netto}})_U &= (e_{\text{Nutz}} - \Sigma e_p)_T \\ \text{kurz } e_{\text{Netto}} &= e_{\text{Nutz}} - \Sigma e_p \end{aligned}$$

auch negative Werte annehmen, d.h. für die Behandlung des Abfalls wird dann mehr Energie benötigt, als der Abfall selbst der Verfahrenslinie zuführt. In diesem Fall führt die Definition des Wirkungsgrads

$$\eta_n = \frac{e_{\text{Netto}}}{h_{\text{AF}}} < 0$$

mit $e_{\text{Netto}} < 0$ zu negativen Werten. Man kann es bei dieser Definition bewenden lassen. Bei sehr kleinen Werten von h_{AF} wird dann vom Betrag her η_n jedoch sehr groß und kann theoretisch (bei $h_{\text{AF}} = 0$) über alle Grenzen gehen. Es ist daher in solchen Fällen zweckmäßig, als Bezugsgröße ($h_{\text{AF}} + |e_{\text{Netto}}|$) zu wählen, d.h. eine Größe a

$$a = \frac{e_{\text{Netto}}}{h_{\text{AF}} + |e_{\text{Netto}}|} \quad (\text{für den Fall } e_{\text{Netto}} < 0)$$

zu bilden, damit aus formalen Gründen der kleinste mögliche Wert für a den Wert $a_{\text{min}} = -1$ annehmen kann. a kann dann nur zwischen 0 und -1 variieren. a wird wegen seiner negativen Werte Aufwandsgrad (und nicht Wirkungsgrad) genannt.

Kap. 6.

Stoffbilanzen (CO₂-Emissionen)

Die vorangegangenen Bilder und Schemata sind nicht nur für Energie- sondern auch zu Massen- und Stoffbilanzen zu verwenden. Trägt man an jeden Strom nicht nur dessen gesamte Masse, sondern auch den jeweils interessierenden Anteil des in ihm enthaltenen Elements ein, z.B. Kohlenstoff, so erhält man eine diesbezügliche Stoffbilanz, z.B. Kohlenstoffbilanz. Über die Zuordnung der Kohlenstoffmengen zu den einzelnen Strömen wird dann unmittelbar auch eine Zuordnung und damit Analyse des Kohlendioxidaufkommens möglich [13, 15]. Über die Systemerweiterung bis zur benötigten Primärressource und weiter bis zu deren Rückführung wird nicht nur eine Nettobetrachtung der allein dem Abfall zuzuschreibenden Energienutzung möglich, sondern auch die allein dem Abfall zuzuschreibenden CO₂-Emissionen z.B. bezogen auf den Nettonutzen.

Andere Elemente wie Schwermetalle, besonders interessierende Verbindungen usw. lassen sich dann ganz analog an jeder Systemgrenze bilanzieren.

Kap. 7.

Beurteilung verschiedener thermischer Verfahren

Will man verschiedene Verfahren miteinander vergleichen, so müssen zunächst gleiche Zielvorgaben festgelegt werden. Danach müssen so viele Teilschritte oder verfahrenstechnische Bausteine durch Systemgrenzen untereinander gekoppelt werden, bis die so entstehenden Blockfließbilder der unterschiedlichen Verfahren bei gleicher Abfallart und gleichem Abfallmassenstrom

- die gleiche Zielstellung der thermischen Behandlung erfüllen, d.h.
 - * ausschließlich thermische Entsorgung und
 - * ggf. zusätzlich energetische Verwertung, z.B. Umwandlung der Abfallenergie in Dampfenergie und anschließende Umwandlung in hochwertige elektrische Energie und
 - * ggf. zusätzlich stoffliche Verwertung durch Umwandlung eines Teils der Abfallenergie in Prozessdampf oder Synthesegas

und

- die austretenden Stoffströme (verbleibende Reststoffe) jeweils den gleichen Anforderungen genügen, z.B.
 - * Eluierbarkeit und Glühverlust der Reststoffe,
 - * vorgegebene Schadstoffkonzentrationen der Abgase

und

- die einzelnen austretenden Stoffströme jeweils direkt in die Umwelt entlassen oder direkt einer vorgesehenen stofflichen Nutzung zugeführt werden können.

Wie bereits erwähnt, erweist es sich dabei als zweckmäßig, die Systemgrenzen zunächst nur für das thermische Hauptverfahren festzulegen. Danach sind unter gleicher Zielvorgabe (s.o.) und gleicher Vorgabe der Anforderungen an die austretenden Stoffe die Systemgrenzen der zu vergleichenden Gesamtverfahren zu erstellen. Wenn z.B. bei einem Verfahren die Asche- oder Schlackenachbehandlung zum Erreichen von Eigenschaften der Reststoffe erforderlich ist, so ist natürlich diese Nachbehandlung mit der betreffenden Systemgrenze als Teilsystem in das Gesamtverfahren und dessen Systemgrenze einzubeziehen.

Kap. 8.

Bewertung von Verfahren mit verschiedenen Behandlungsarten

Zur Beurteilung von Verfahren, die verschiedene Verfahrensarten wie thermische, mechanische, biologische Behandlung miteinander koppeln, bilanziert man zunächst wie beschrieben die einzelnen mechanischen, biologischen, thermischen und ggf. weiteren Bausteine und schaltet sie mit ihren Systemgrenzen entsprechend dem technischen Aufbau in Reihen (oder parallel). Auf diese Weise erhält man Verfahrensketten, die selbst wieder im Sinne des Kapitels 1 als *Anlage* bezeichnet werden können. Die gesamte Systemgrenze (Bilanzkreis) einer Verfahrenskette kann wieder eingebettet sein in ein Nutzerverhalten, in eine die Primärenergie zusätzlich berücksichtigende Betrachtungsweise bis hin zur Rückführung der benötigten Primärenergie, um die Nettowirkung zu ermitteln.

Kap. 9.

Einsatz von Abfall in anderen industriellen Hochtemperaturverfahren

Die Mitverbrennung von Abfällen in Industriefeuerungen wird derzeit intensiv diskutiert.

Kap. 9.1.

Brennstoffsubstitution, Energieaustauschverhältnis

Wenn Abfall (Restmüll) in anderen industriellen Hochtemperaturverfahren (z.B. Zement- und Stahlherstellung) Verwendung finden soll, so ist er in der Regel

zunächst so aufzubereiten, dass ein Ersatzbrennstoff, d.h. ein Brennstoff entsteht, der den regulären Brennstoff (Regelbrennstoff) in einer Anlage als *Energie-lieferant* ersetzen kann. Dieser Ersatzbrennstoff ist nun weiter in der Regel energetisch nicht gleichwertig mit dem Regelbrennstoff. Wenn z.B. die Energie *1 kJ elektrische Energie* selbstverständlich nicht gleichwertig ist mit der Energieeinheit *1 kJ an Erdgas gebunden*, so ist natürlich auch z.B. *1 kJ an Ersatzbrennstoff gebunden* nicht gleichwertig mit *1 kJ an Erdgas gebunden* usw. Es ist somit für den jeweils spezifischen Anwendungsfall das Energieaustauschverhältnis f_{sub} zu ermitteln, das ausdrückt, wieviel Energieeinheiten aus dem Ersatzbrennstoff notwendig sind, um *eine* Energieeinheit aus dem betrachteten Regelbrennstoff zu ersetzen. Das Energieaustauschverhältnis ist von einer Reihe von Einflussgrößen anhängig. Hier wird auf das Schrifttum verwiesen [z.B. 2 bis 5 und 7 bis 14].

Kap. 9.2.

Bewertung von Ersatzbrennstoff aus Restmüll

Will man beispielsweise die Frage beantworten, ob der Einsatz von Restmüll zum Ersatz von Kohle in einem Klinkerdrehrohr der Zementindustrie energetisch sinnvoll ist oder nicht, so ist es nicht ausreichend, zu ermitteln, welche Kohlenmenge durch welche Restmüllmenge ersetzt wird, selbst wenn man das Energieaustauschverhältnis, das in der Regel nicht den Wert eins annimmt ($f_{\text{sub}} \neq 1$), berücksichtigt.

Eine Bewertung kann nur geschehen, wenn man

- die Situation *ohne Brennstoffsubstitution*,
d.h. die Summe aus
einer (einzelnen) Abfallverbrennungsanlage und
einem (einzelnen) kohlebetriebenen Klinkerdrehrohr,
wobei also die Grenze beide Einzelprozesse einschließt und somit zu dem Gesamtsystem *ohne Brennstoffsubstitution* zusammenbindet,
- mit der Situation *mit Brennstoffsubstitution*,
d.h. mit dem entstehenden Koppelprozess, dessen Systemgrenze
die Aufbereitung des Restmülls,
die Brennstoffsubstitution im Klinkerdrehrohr,
die Verwendung des bei der Aufbereitung wiederum verbleibenden Restes in einer zugehörigen Abfallverbrennungsanlage mit der dann eventuell erforderlichen Zusatzenergie,
die Anlage zur Verwendung des ersetzten Regelbrennstoffes
beinhalten muss,

vergleicht, wenn man also die Wirkung der Summe der Einzelprozesse (Situation *ohne Brennstoffsubstitution*) mit der Wirkung der bei der Situation *mit Brennstoffsubstitution* entstehenden gesamten Verfahrenskette (Koppelprozess) vergleicht.

Bei diesem Vergleich ist weiter entscheidend, dass

die Wirkung der Summe der Einzelprozesse

und

die Wirkung des Koppelprozesses

nur dann unmittelbar verglichen werden können, wenn bei beiden Situationen von den gleichen Einsatzstoffmengen ausgegangen wird, d.h.

die Einzelprozesse zusammen

genauso viel Abfall- und Kohlenmengen als Input erhalten

wie der Koppelprozess.

Auf der Basis gleicher produzierter Mengen an Produkt (hier Klinker) für beide Situationen erkennt man dann, ob die Summe der Einzelprozesse oder der Koppelprozess mehr Energie (z.B. thermische oder elektrische Energie) bereitstellt. Dabei ergibt sich (hier sei auf das Schrifttum (vgl. z.B. [10, 13]) verwiesen), dass eine Brennstoffsubstitution von vornherein keine bessere Variante sein muss. Es ergeben sich häufig Fälle, wo es besser ist, die Prozesse einzeln zu betreiben, d.h. eine Brennstoffsubstitution nicht vorzunehmen. Diese Aussage betrifft *nur* energetische d.h. energiewirtschaftliche Aspekte. Betriebswirtschaftlich (geldwirtschaftlich) kann das Ergebnis durchaus gegenüber der rein energiewirtschaftlichen Betrachtung in das Gegenteil verkehrt werden.

Die Zusammenhänge sind komplex und ohne genaue Festlegung von Systemgrenzen mit Untersystemgrenzen nicht zu bewältigen.

Kap. 10.

Bewertungsmaßstäbe des Energieeinsatzes bei reinen Stoffbehandlungsprozessen

Auch hier sei vorweg auf das zugehörige Schrifttum verwiesen [z.B. 6]. Bei Stoffbehandlungsprozessen ist der Aufwand die Summe der zugeführten Energieströme, der Nutzen jetzt jedoch kein Energiestrom sondern der produzierte Stoffstrom (Produktionsstrom).

- Nimmt man zunächst an, dass bei der Stoffbehandlung keine chemisch gebundenen Energieformen auftreten, dann dient die aufgewendete Energie nur der Deckung der auftretenden Verluste, da der Produktstrom bei Umgebungstemperatur anfallen möge und somit keine Energie in ihm enthalten ist.

Es liegt kein energetischer Nutzen vor. In solchen Fällen bildet man zur Beschreibung der Wirkung des Prozesses die Kenngröße

$$e_{\text{prod}} = \frac{\text{Aufwand an Energie}}{\text{Menge des Produktes (Nutzens)}}.$$

Hieraus erhält man z.B. die Kenngröße des spezifischen Energiebedarfs e_{prod} mit der Einheit kJ/kg Produkt. Je kleiner der Wert ist, umso besser ist die betrachtete Anlage und umso besser sind folglich die Wärmetauscher⁵⁾ zur internen Energierückgewinnung. Bei idealem Wärmetausch (theoretischer, nicht erreichbarer Grenzfall) ergäbe sich so z.B. trotz sehr hoher Prozess-temperaturen (Brenntemperaturen) kein Energieaufwand ($e_{\text{prod}} = 0$), weil keine Verluste vorliegen (ideale Anlage). Für diesen theoretischen Fall wird auch manchmal der Begriff *Nullwirkungsgrad* gebraucht.

Die Diskussion darüber, wo welche Teilenergien im Prozess benötigt werden, ist auch hier nur anhand von geeigneten Systemgrenzen möglich.

- Nimmt man an, dass bei der Stoffbehandlung chemisch gebundene Energieformen auftreten, z.B. beim *Kalkbrennen* (Temperaturniveau 900 °C), so erhält man die Aussage, dass der kleinste Wert für den Aufwand – thermodynamisch/chemisch bedingt – die Bindungsenthalpie ist. Beim Kalkbrennen ist dies die chemisch aufzubringende Energie für die Entsäuerung. Wenn also reale Anlagen z.B.

$$(e_{\text{prod}})_{\text{real}} = 3.800 \text{ kJ/kg Branntkalk}$$

erreichen, so ist diese Größe zur Bewertung an dem Grenzwert

$$(e_{\text{prod}})_{\text{min}} = 3.150 \text{ kJ/kg Branntkalk}$$

zu messen.

- Wird für einen Prozess Energie benötigt, so hat man also zu unterscheiden, ob man
 - * den Fall *Energieeinsatz zur reinen Energiewandlung* (Kraftwerke (Müllkraftwerk), Verkehr, Heizungen)
 - * oder den Fall *Energieeinsatz zur Stoffbehandlung* (Grundstoffindustrie wie Stahl, Zement usw.)

jeweils betrachtet.

Kap. 11.

Bedeutung und Verwendung von Systemgrenzen

Systemgrenzen spielen insbesondere bei der Bildung von Kennzahlen eine wichtige Rolle.

⁵⁾ Die zugehörigen Teilanlagen, die Wärmetauscher genannt werden, können selbst wieder ausschließlich nach ihrer Wirkung im Hinblick auf die getauschte Energie, d.h. mit einer reinen Energiebilanz und zugehörig mit energetischen Wirkungsgraden anhand geeigneter Untersystemgrenzen beurteilt werden.

Kap. 11.1.

Bildung von Wirkungsgraden

Wirkungsgrade gehören zu den wichtigsten Kennzahlen die mit Hilfe von Systemgrenzen gebildet werden können.

Die vorgenannten Beispiele zeigen (Bilder 1 bis 5, Prinzipschemata 1 bis 4), dass man an ein und der gleichen Problemstellung Wirkungsgrade zwischen 78 % und 34 % angeben kann. Der Übersichtlichkeit wegen wird hier nur thermischer Nutzen betrachtet. Beginnt man z.B. mit dem so genannten Kesselwirkungsgrad und nimmt bei der Nutzung eine elektrische Umwandlung hinzu, so wird verständlich, dass man an ein und derselben Problemstellung bei Fragen nach der Energieeffizienz je nach Interpretation und Absicht mit der Nennung von Wirkungsgraden um 90 % aber auch bis hinunter um 10 % antworten kann. Was bei der Nennung einer Zahl gemeint ist, kann nur in Verbindung mit einer eindeutigen Festlegung einer Systemgrenze verdeutlicht werden.

Kap. 11.2.

Bildung von Kenngrößen und weiteren Kennzahlen

Man hat zu unterscheiden zwischen Kennzahlen und Kenngrößen.

Kennzahlen sind wirkliche Zahlen (d.h. Werte) ohne Einheit wie die zuvor genannten Wirkungsgrade, aber auch andere bezogene Größen wie etwa

- Angaben zu der erforderlichen Energie einer Abgasreinigung im Verhältnis zur Summe aller zugeführten Energien (Aufwand) an einer Anlage oder
- Angaben zu Nutzenergie im Verhältnis zur benötigten Zusatzenergie (Fremdenergie)
- usw.

Kenngrößen sind dagegen Zahlen mit Einheit. So sind

- CO₂-Mengenangaben bezogen auf Energien (Einheit kg CO₂/kWh o.ä),
- Emissionsfrachten in ppm NO_x/t Abfall oder
- Werte für den spezifischen Energiebedarf bei der Stoffbehandlung (Einheit kJ/kg Produkt, vgl. Kapitel 10)

typische Kenngrößen.

Zur Bildung von Kennzahlen und Kenngrößen sind gleichermaßen folgende Bemerkungen wichtig:

- Die Nennung und Darstellung der jeweiligen Systemgrenzen ist notwendig, damit deutlich wird, an welchen Systemgrenzen Kennzahlen und Kenngrößen gebildet werden.

- Man ist in der Bildung von Kennzahlen und Kenngrößen grundsätzlich frei. Sie sollten jedoch einen physikalischen Hintergrund darlegen, d.h. sie sollten physikalisch technisch interpretierbar sein und z.B. gestatten, unterschiedliche Anlagen physikalisch usw. miteinander zu vergleichen. Als Beispiel sei genannt, dass beim Vergleich von Anlagen-Emissionen die Nennung von Abgasfrachten tragfähiger ist als die Nennung von Konzentrationen.
- Bei der Bildung von Kennzahlen sollte geprüft werden, ob ihre physikalische Aussage in einer Wirkungsgraddefinition (z.B. Bilder 1 bis 5) bereits enthalten ist.

Kap. 11.3.

Zeitliche Abhängigkeiten

Die jeweiligen Bilder mit den verschiedenen Strömen und zugehörigen Größenangaben sind häufig *Momentaufnahmen*, da die zugeführten und auch abgeführten Ströme teilweise sehr stark schwanken. Zeichnet man interessierende Ströme – am häufigsten werden dies die Nutzströme sein – zeitlich auf, so kann man aus einer automatisiert durchgeführten Integration Stunden-, Tages-, Monats- und Jahresmittel und die zugehörigen Mittelwerte auch für Kennzahlen und Kenngrößen bilden.

Kap. 11.4.

Berücksichtigung von Quellen und Senken

Bei der Festlegung von Systemgrenzen können grundsätzlich auch Senken und Quellen berücksichtigt werden. Senken – speichernde Vorgänge in einer Anlage – werden als abgeführte Ströme und Quellen – freisetzende Vorgänge in einer Anlage – werden als zugeführte Ströme an dem System angetragen und zur weiteren besseren Kennzeichnung zusätzlich mit einem auf *Quelle* oder *Senke* hinweisenden Index versehen.

Kap. 12.

Schrifttum

- [1] Beckmann, M.; Horeni, M.; Scholz, R.; Harnaut, T.: Einfluß der Prozeßführung auf den spezifischen Energieverbrauch in Verfahren der Grundstoffindustrie beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen. VDI-Berichte 1708, *Ersatzbrennstoffe in der Energietechnik*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002, ISBN 3-18-091708-3, S. 131-163

- [2] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. Energy evaluation of the substitution of fuels by replacement fuels in high temperature material treatment processes.
Teil 1/Part 1 in: ZKG International 52 (1999) Nr. 6, S. 287-303
Teil 2/Part 2 in: ZKG International 52 (1999) Nr. 8, S. 411-419
- [3] Cernoch, S.: Vergleichende wärmetechnische Bewertung von Brennstoffen für Industrieöfen. In: Archiv für das Eisenhüttenwesen 44 (1973), Nr.7, S. 521-527
- [4] Cernoch, S.F.: Die wärmetechnischen Gesetzmäßigkeiten des Brennstoffaustausches bei Industrieöfen. In: gas wärme international, Bd. 27 (1978), Nr.4
- [5] Görgen, R.; Kahnwald, H.: Vergleichende Bewertung von Gasen. In: gas wärme international, Bd. 17 (1968), Nr.2, S. 50-53
- [6] Jeschar, R.; Specht, E.; Bittner, H.-G.: Wärmebehandlungsanlagen und -öfen. In: Spur, G. (Hrsg.): Handbuch der Fertigungstechnik, Band 4/2, München, Wien: Carl-Hanser-Verlag, 1987, S. 649-714
- [7] Kahnwald, H.: Wärmetechnische Bewertung von gasförmigen und flüssigen Austauschbrennstoffen. In: Archiv für das Eisenhüttenwesen 35 (1964), Nr. 10
- [8] Lüth, F.: Bewertung verschiedener Brennstoffe. In: Stahl und Eisen 71 (1951), Nr.7
- [9] Lüth, F.: Die Wertigkeit von Gasen gegenüber anderen Brennstoffen und Energien in der Industrie. In: Stahl und Eisen 78 (1958), Nr.15
- [10] Marcard, W.: Zusammenhänge zwischen Feuerraum, Feuerraumtemperatur, Verbrennungsvorgang und Wirkungsgrad. In: Die Wärme/Zeitschrift für Dampfkessel und Maschinenbetrieb 53, (1930), Nr. 39
- [11] Michalowski, M.; Wessely, R.: Bewertung der komplexen Austauschbarkeit von Brenngasen in Hüttenwerken. In: Archiv für das Eisenhüttenwesen 54 (1983), Nr.6
- [12] Scholz, R.; Beckmann, M.: Ersatzbrennstoffbewertung bei unterschiedlicher Prozessführung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 2. Neuruppin: TK Verlag, 2002, S. 73-90
- [13] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden: Teubner-Reihe UMWELT, B. G. Teubner GmbH, 2001, ISBN 3-519-00402-X
- [14] Stahleisen m.b.H.: Richtlinien zur vergleichenden Brennstoffbewertung. Düsseldorf, 1969, S. 3-33
- [15] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinien VDI 4660: Ermittlung zielenergiebezogener Emissionen bei der Energieumwandlung. Mai 2003
- [16] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinien VDI 4661: Energiekenngrößen; Definitionen – Begriffe – Methodik. September 2003

